

Proyecto Fin de Máster Universitario de Ingeniería Industrial

Optimización de sistemas solares térmicos para producción de ACS en viviendas

Autora: Isabel Ledesma Montaña

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

**Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Industrial

Optimización de sistemas solares térmicos para producción de ACS en viviendas

Autora:

Isabel Ledesma Montaña

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Máster: Optimización de sistemas solares térmicos para producción de ACS en viviendas

Autora: Isabel Ledesma Montaña

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

Resumen

En este trabajo se ha enfocado las instalaciones de agua caliente sanitaria de una forma distinta a la común. Se han buscado los valores de área y volumen óptimos en términos económicos, con las restricciones impuestas en el *Documento Básico de Ahorro de Energía HE4*. Para ello se han extraído funciones polinómicas interpoladas a partir de casos en los que se ha buscado un área de captación y un volumen de acumulación que minimice la función objetivo que recoge el coste económico.

Se ha comenzado haciendo una descripción de la energía solar y de las instalaciones de agua caliente sanitaria (ACS), así como de su casuística. Se prosigue con el desarrollo de las ecuaciones del método f-Chart, en las que se ha basado para realizar los cálculos. Se finaliza con la obtención de funciones de área y volumen, que engloban todos los casos posibles de las provincias de Andalucía con la ayuda del software *EES*. Estos valores serán los más económicos para cada instalación, y dependerán de los términos anuales de la radiación, la demanda y fracción de la demanda que se debe cubrir según el reglamento.

Índice

Resumen	9
Índice	10
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras	15
1 Introducción	18
1.1. <i>El Sol</i>	19
1.2. <i>Energía Solar</i>	19
1.3. <i>Situación española</i>	21
2 Agua Caliente sanitaria	23
2.1. <i>Captador solar</i>	23
2.1.1. <i>Tipología</i>	24
2.1.1.2. <i>Captadores CPC</i>	24
2.1.1.3. <i>Captadores planos</i>	25
<i>Pérdidas por orientación, inclinación y sombras</i>	27
<i>Rendimiento</i>	28
2.2. <i>Acumulador</i>	28
2.2.1. <i>Tipología</i>	29
2.3. <i>Circulación</i>	32
2.4. <i>Sistema hidráulico</i>	33
2.4.1. <i>Circuito primario</i>	34
2.5. <i>Sistema auxiliar</i>	37
2.5. <i>Otras aplicaciones del ACS</i>	38
2.6. <i>Mantenimiento</i>	41
<i>Legionelosis</i>	42
3 Descripción método f-chart	43
3.1. <i>Punto de partida</i>	45
4 Caso práctico	53
4.1. <i>Código</i>	54
4.2. <i>Función objetivo</i>	55
4.3. <i>Ejemplos</i>	57
<i>Hotel 5*</i>	58
<i>Vivienda</i>	68
<i>Residencia</i>	74
4.4. <i>Relación $f_{anual} - V/A$</i>	77
4.5. <i>Fracciones mensuales</i>	79
4.6. <i>Factores de ganancias y de pérdidas</i>	80
4.7. <i>Función global para Sevilla</i>	81
4.7.1. <i>Ejemplos</i>	82
<i>Restaurante</i>	82
<i>Camping</i>	84
<i>Fábrica</i>	86
<i>Cuartel</i>	88

Hospital	90
Vivienda	92
<i>4.8. Función global para Andalucía</i>	<i>94</i>
<i>Ejemplos</i>	<i>97</i>
Jaén	97
Huelva	98
Sevilla	99
Almería	99
Córdoba	100
Cádiz	100
Málaga	101
Granada	102
5 Conclusiones	103
ANEXO A	104
ANEXO B	105
ANEXO C	107
ANEXO D	108
ANEXO E	117
Referencias	120

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Situación de la energía solar en Andalucía 2018 (2)</i>	22
<i>Tabla 2 Pérdidas límites</i>	27
<i>Tabla 3 Válvulas según función</i>	36
<i>Tabla 4 Rendimientos útiles según RD 275/1995</i>	38
<i>Tabla 5 Porcentaje mínimo a cubrir en piscinas</i>	38
<i>Tabla 6 Plan de observación</i>	41
<i>Tabla 7 Mantenimiento en Sistema de Captación</i>	42
<i>Tabla 8 Rango de variación de parámetros</i>	43
<i>Tabla 9 Demanda de referencia a 60 °C (3)</i>	47
<i>Tabla 10 Día del año y declinación característica del mes</i>	48
<i>Tabla 11 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	52
<i>Tabla 12 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	54
<i>Tabla 13 Pérdidas máximas</i>	57
<i>Tabla 14 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	59
<i>Tabla 15 Optimización para Hotel 5 estrellas</i>	63
<i>Tabla 16 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V</i>	65
<i>Tabla 17 Optimización para Hotel 5 estrellas</i>	68
<i>Tabla 18 Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado</i>	68
<i>Tabla 19 Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado</i>	68
<i>Tabla 20 Optimización para viviendas multifamiliares</i>	69
<i>Tabla 21 Optimización para residencia</i>	75
<i>Tabla 22 Valores mensuales de fracción mensual en Sevilla con fracción anual de 0,6</i>	79
<i>Tabla 23 Valores mensuales de fracción mensual en Sevilla con fracción anual de 0,7</i>	79
<i>Tabla 24 Demanda energética en restaurante</i>	83
<i>Tabla 25 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V</i>	83
<i>Tabla 26 Resultados y comparaciones. Restaurante</i>	84
<i>Tabla 27 Prueba de resultados. Restaurantes</i>	84
<i>Tabla 28 Resultados. Restaurante</i>	84
<i>Tabla 29 Demanda energética en camping</i>	85
<i>Tabla 30 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V</i>	85
<i>Tabla 31 Resultados y comparaciones. Camping</i>	86
<i>Tabla 32 Prueba de resultados. Camping</i>	86
<i>Tabla 33 Resultados. Camping</i>	86

<i>Tabla 34 Demanda energética en fábrica</i>	87
<i>Tabla 35 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V</i>	87
<i>Tabla 36 Resultados y comparaciones. Fábrica</i>	87
<i>Tabla 37 Prueba de resultados. Fábrica</i>	88
<i>Tabla 38 Resultados. Fábrica</i>	88
<i>Tabla 39 Demanda energética en cuartel</i>	89
<i>Tabla 40 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V</i>	89
<i>Tabla 41 Resultados y comparaciones. Cuartel</i>	89
<i>Tabla 42 Prueba de resultados. Cuartel</i>	90
<i>Tabla 43 Resultados. Cuartel</i>	90
<i>Tabla 44 Demanda energética en hospital</i>	91
<i>Tabla 45 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V</i>	91
<i>Tabla 46 Resultados y comparaciones. Hospital</i>	91
<i>Tabla 47 Prueba de resultados. Hospital</i>	92
<i>Tabla 48 Resultados. Hospital</i>	92
<i>Tabla 49 Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado</i>	92
<i>Tabla 50 Demanda energética en vivienda</i>	93
<i>Tabla 51 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V</i>	93
<i>Tabla 52 Resultados y comparaciones. Vivienda</i>	93
<i>Tabla 53 Prueba de resultados. Vivienda</i>	94
<i>Tabla 54 Resultados. Vivienda</i>	94
<i>Tabla 55 Pérdidas máximas por orientación e inclinación y sombras</i>	97
<i>Tabla 56 Pérdidas por inclinación y orientación en cada provincia</i>	97
<i>Tabla 57 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	98
<i>Tabla 58 Resultados obtenidos. Jaén</i>	98
<i>Tabla 59 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	98
<i>Tabla 60 Resultados obtenidos. Huelva</i>	98
<i>Tabla 61 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	99
<i>Tabla 62 Resultados obtenidos. Sevilla</i>	99
<i>Tabla 63 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	99
<i>Tabla 64 Resultados obtenidos. Almería</i>	100
<i>Tabla 65 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	100
<i>Tabla 66 Resultados obtenidos. Córdoba</i>	100
<i>Tabla 67 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	101
<i>Tabla 68 Resultados obtenidos. Cádiz</i>	101
<i>Tabla 69 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	101
<i>Tabla 70 Resultados obtenidos. Málaga</i>	101
<i>Tabla 71 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	102

<i>Tabla 72 Resultados obtenidos. Granada</i>	102
<i>Tabla 73 Temperatura media del agua fría</i>	104
<i>Tabla 74 Índice de claridad, radiación extraterrestre en superficie horizontal y global horizontal mensual en Sevilla</i>	105
<i>Tabla 75 Radiación desglosada en Sevilla</i>	106
<i>Tabla 76 Radiación media mensual diaria y temperatura ambiente en las provincias andaluzas</i>	107
<i>Tabla 77 Optimizaciones en instalaciones de Córdoba</i>	108
<i>Tabla 78 Optimizaciones en instalaciones de Huelva</i>	109
<i>Tabla 79 Optimizaciones en instalaciones de Sevilla</i>	110
<i>Tabla 80 Optimizaciones en instalaciones de Cádiz</i>	111
<i>Tabla 81 Optimizaciones en instalaciones de Jaén</i>	112
<i>Tabla 82 Optimizaciones en instalaciones de Málaga</i>	113
<i>Tabla 83 Optimizaciones en instalaciones de Granada</i>	114
<i>Tabla 84 Optimizaciones en instalaciones de Almería</i>	115
<i>Tabla 85 Pérdidas máximas por orientación e inclinación y sombras</i>	117
<i>Tabla 86 Contribución solar mínima (%) para ACS</i>	118
<i>Tabla 87 Resultados</i>	119

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Imagen 1 Evolución de la potencia instalada renovable en España (MW)</i>	18
<i>Imagen 2 Estructura de generación mensual peninsular, marzo 2019 REE</i>	18
<i>Imagen 3 Globo terrestre</i>	19
<i>Imagen 4 Instalación fotovoltaica</i>	20
<i>Imagen 5 Sistema de agua caliente sanitaria</i>	20
<i>Imagen 6 Instalación de alta temperatura. Central solar de torre.</i>	20
<i>Imagen 7 Irradiación solar en Europa</i>	21
<i>Imagen 8 kWh/m² y horas de sol al año (3)</i>	21
<i>Imagen 9 Evolución de GW de energía solar por países</i>	22
<i>Imagen 10 Esquema general de ACS</i>	23
<i>Imagen 11 Captador CPC</i>	24
<i>Imagen 12 Balance en captador solar plano (1)</i>	25
<i>Imagen 13 Clasificaciones de captadores solares planos</i>	26
<i>Imagen 14 Partes del captador solar</i>	26
<i>Imagen 15 Captador con absorbedor tipo parrilla y serpentín</i>	26
<i>Imagen 16 Captador plano</i>	27
<i>Imagen 17 Captador con tubos al vacío</i>	27
<i>Imagen 18 Rendimiento de captador plano</i>	28
<i>Imagen 19 Acumuladores en instalación de ACS</i>	29
<i>Imagen 20 Tipología según sistema de intercambio</i>	29
<i>Imagen 21 Doble serpentín</i>	30
<i>Imagen 22 Doble envolvente</i>	30
<i>Imagen 23 Centralizado e individual</i>	31
<i>Imagen 24 Termosifón</i>	32
<i>Imagen 25 Circulación forzada</i>	32
<i>Imagen 26 Retorno invertido</i>	33
<i>Imagen 27 Configuración paralela (superior) y en serie (inferior)</i>	33
<i>Imagen 28 Configuración serie-paralelo</i>	34
<i>Imagen 29 Circuito primario</i>	34
<i>Imagen 30 Instalación con vaso de expansión cerrado (4)</i>	35
<i>Imagen 31 Ábaco de rendimiento de calderas. RITE 2007</i>	37
<i>Imagen 32 Instalación de captadores solares para piscinas (6)</i>	39
<i>Imagen 33 ACS y suelo radiante</i>	39
<i>Imagen 34 Captador solar para ACS y calefacción (7)</i>	40
<i>Imagen 35 CHEQ 4</i>	43

<i>Imagen 36 Curva f</i>	44
<i>Imagen 37 Corrección gráfica por caudal</i>	45
<i>Imagen 38 Captadores en serie</i>	46
<i>Imagen 39 Dependencia de CA de NS</i>	46
<i>Imagen 40 Órbita terrestre</i>	49
<i>Imagen 41 Radiación directa, reflejada y difusa</i>	50
<i>Imagen 42 Recta ajustada a dispersión de datos</i>	53
<i>Imagen 43 Función minimizar, EES</i>	55
<i>Imagen 44 Límites de V/A</i>	55
<i>Imagen 45 Captador elegido</i>	56
<i>Imagen 46 Depósito de inercia</i>	56
<i>Imagen 47 Pérdidas por orientación e inclinación en función de inclinación y de acimut</i>	57
<i>Imagen 48 Zonas en función de la radiación</i>	58
<i>Imagen 49 Representación de FO frente V/A</i>	59
<i>Imagen 50 Representación de FO frente V/A</i>	60
<i>Imagen 51 Evolución de la fracción de demanda mensual cubierta</i>	60
<i>Imagen 52 Evolución mensual de demanda</i>	61
<i>Imagen 53 Evolución del factor de ganancias</i>	62
<i>Imagen 54 Evolución del factor de pérdidas</i>	62
<i>Imagen 55 Hotel 5 estrellas: demanda energética vs ocupación</i>	63
<i>Imagen 56 Hotel 5 estrellas: FO vs ocupación</i>	64
<i>Imagen 57 Área real vs predicción. Hotel 5*. 100%</i>	65
<i>Imagen 58 Área real y resultante de la ecuación. Hotel 5*</i>	66
<i>Imagen 59 Volumen real vs predicción. Hotel 5*. 99,99 %</i>	66
<i>Imagen 60 Volumen real y resultante de la ecuación. Hotel 5*</i>	67
<i>Imagen 61 Edificio de viviendas. Área de captación frente número de viviendas</i>	70
<i>Imagen 62 Área real vs predicción. Edificio de viviendas. 99,97 %</i>	71
<i>Imagen 63 Área real vs predicción. Edificio de viviendas. 100 %</i>	71
<i>Imagen 64 Área real y resultante de la ecuación. Viviendas</i>	72
<i>Imagen 65 Volumen real vs predicción. Edificio de viviendas. 99,94 %</i>	73
<i>Imagen 66 Volumen real vs predicción. Edificio de viviendas. 100 %</i>	73
<i>Imagen 67 Volumen real y resultante de la ecuación. Viviendas</i>	74
<i>Imagen 68 Área real vs predicción. Residencia. 99,98 %</i>	75
<i>Imagen 69 Área real y resultante de la ecuación. Residencia</i>	76
<i>Imagen 70 Volumen real vs predicción. Residencia. 99,95 %</i>	76
<i>Imagen 71 Volumen real y resultante de la ecuación. Residencia</i>	77
<i>Imagen 72 V/A vs V/A predicción. 99,99 %</i>	78
<i>Imagen 73 Evolución de V/A_{óptimo} frente f_{anual}</i>	78

<i>Imagen 74 f mensual</i>	79
<i>Imagen 75 Cobertura porcentual mensual de la caldera</i>	80
<i>Imagen 76 Coeficientes de ganancias</i>	80
<i>Imagen 77 Coeficientes de pérdidas</i>	81
<i>Imagen 78 A vs A predicción. 100 %</i>	81
<i>Imagen 79 V vs V predicción. 100 %</i>	82
<i>Imagen 80 Area real vs predicción. Andalucía. 99,98 %</i>	95
<i>Imagen 81 Volumen real vs predicción. Andalucía. 99,92 %</i>	96

1 INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son recursos limpios e inagotables que proporciona la naturaleza. Éstas contribuyen a disminuir la dependencia de las no renovables. Se definen como fuente de energía no renovable aquella que está almacenada en cantidades inicialmente fijas. Las reservas disponibles dependerán de la factibilidad económica y técnica de su explotación. Entre las energías no renovables se pueden encontrar las procedentes de los combustibles fósiles y la nuclear. Con el menor consumo de las energías no renovables se pretende evitar las secuelas medioambientales que éstas conllevan y la pérdida de las reservas limitadas de materias primas, entre otras consecuencias. Esto ha propiciado el desarrollo de la tecnología para la explotación de las energías renovables en las últimas décadas.

Entre las energías renovables se encuentra la energía solar, hidráulica, eólica, minieólica, marina, geotérmica, la biomasa y los biocarburantes. En España, la integración en las Cumbres de Río de Janeiro (Agenda 21, 1993) y Kioto (1997), y los puntos estipulados en el Programa de Medio Ambiente de la Unión Europea (1), han hecho que el marco político marque un camino hacia la mejora del medio ambiente y el mantenimiento de los recursos naturales, para ello una participación progresiva de las energías renovables en el consumo térmico y la generación eléctrica es clave.

La mayor o menor explotación de cada una de las energías limpias dependerá de la zona geográfica, entre otros factores. La posición geográfica de España favorece la explotación de la energía hidráulica, solar y eólica.

En España las renovables representaban en 2017 un 46 % de la potencia instalada, con 48 185 MW. Una cifra que apenas ha variado en un 0.6 % desde 2013, como se puede apreciar en la siguiente imagen (1).



[1] Incluye biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeólica y residuos renovables.
Fuente Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) hasta 2014.

Imagen 1 Evolución de la potencia instalada renovable en España (MW)

En el mes de marzo de 2019 el porcentaje de generación procedente de las energías renovables es de 43,6 %, como se puede comprobar en la Imagen 2. En comparación a 2017 el porcentaje es prácticamente similar, al igual que en 2013, lo que parece indicar que la inversión en las renovables para la generación de electricidad ha quedado estancada.

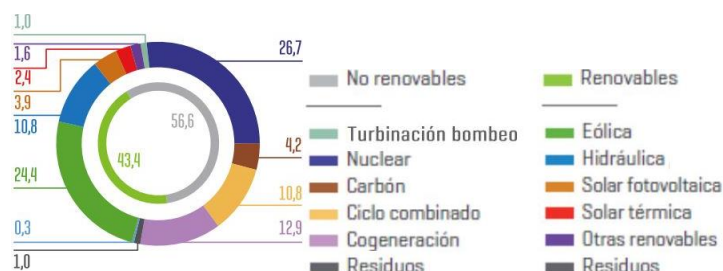


Imagen 2 Estructura de generación mensual peninsular, marzo 2019 REE

De esta forma, España se sitúa lejos de uno de los denominados *Países Verdes*, como Noruega, donde el 98 % de su energía procede de fuentes renovables, siendo su principal fuente las centrales hidroeléctricas. También lejos se sitúa la ínfima media mundial, donde la contribución de las energías renovables apenas representaba un 10 % del total en 2016, y un 12% en el 2017.

1.1. El Sol

Una de las grandes energías renovables de España es la energía solar, cuyo incipiente es el Sol. El Sol está formado por gas a alta temperatura (6000 K), en su núcleo se producen reacciones atómicas de fusión nuclear que convierte hidrógeno en helio. Este proceso libera una gran cantidad de energía, y parte de ésta llega hasta la tierra.

A nuestro planeta llega un aporte de 1367 W/m^2 gracias a la radiación solar, este valor es la denominada constante solar. Debido a la inclinación de nuestro planeta respecto al Sol ($23,5^\circ$) no todos los puntos del planeta recibirán la misma cantidad de energía. Los polos reciben menor radiación, los trópicos son los que están expuestos a mayor radiación.

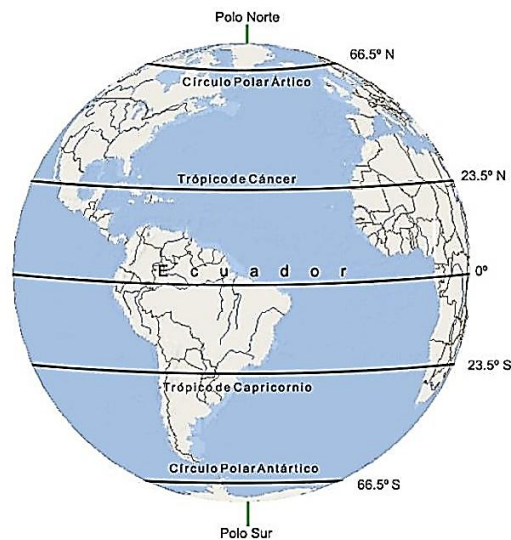


Imagen 3 Globo terrestre

Los valores más elevados de radiación no se producen en el ecuador, sino en latitudes por encima y por debajo de los trópicos de Cáncer y Capricornio, debido a la declinación del Sol (Imagen 3). En estas zonas los rayos solares son más perpendiculares.

La magnitud que mide la radiación solar sobre una superficie es la irradiación. Se distinguen dos componentes de la irradiación incidente en un punto:

- Irradiación solar directa: llega al cuerpo desde la dirección del Sol.
- Irradiación solar difusa: su dirección ha sido modificada por la densidad atmosférica, partículas, ... se considera que proviene de todas las direcciones.

Para cielos despejado predominará la irradiación solar directa, mientras que en días nublados será la difusa. La suma de ambas constituye la irradiación total.

1.2. Energía Solar

La radiación solar hace que nuestro planeta reciba un aporte energético de aproximadamente 1367 W/m^2 . En un año esta energía equivaldría a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustibles fósiles del mundo (2).

La energía solar es una energía renovable y limpia, que ha sido usada por el ser humano desde la antigüedad

hasta nuestros días, donde las tecnologías han ido evolucionando. Estas tecnologías han facilitado la obtención de un beneficio de esta radiación por distintos medios y de una forma más eficiente. El aprovechamiento directo de la energía solar se puede realizar transformándola mediante la tecnología adecuada en energía térmica o en energía eléctrica. Las más habituales:

- **Energía solar pasiva:** es el aprovechamiento de la energía solar de forma directa, sin transformarla en ningún tipo de energía, para su uso inmediato o su almacenamiento sin necesidad de sistemas mecánicos ni aporte externo de energía. Usada en arquitectura bioclimática.
- **Energía solar activa:**
 - Energía solar fotovoltaica: es la obtención de electricidad a partir de la radiación solar con el uso de células fotovoltaicas.

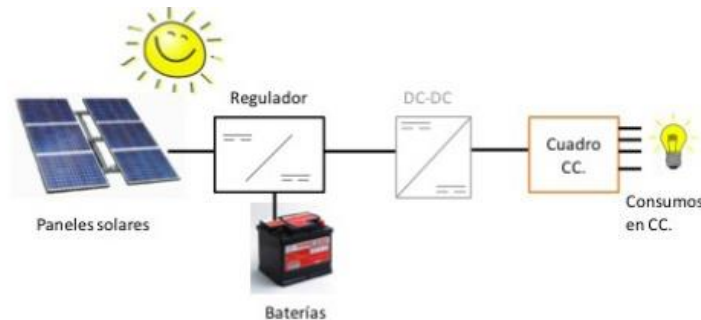


Imagen 4 Instalación fotovoltaica

- Energía solar térmica: consiste en producir calor a partir de la energía solar a partir de colectores, donde se pueden clasificar como:
 - Colector de baja temperatura: se capta la radiación solar y se convierte en energía térmica. Es común en sistemas de producción de agua caliente sanitaria.

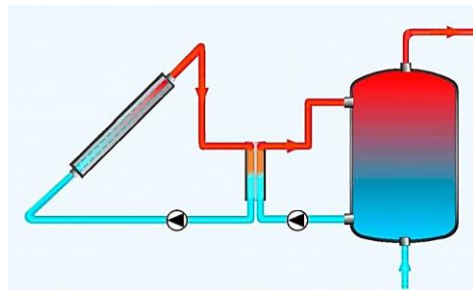


Imagen 5 Sistema de agua caliente sanitaria

- Colector de media y alta temperatura: su fin es la obtención de electricidad a partir de la energía solar. Existe distintas tecnologías, como los capatadores cilindro parabólicos, las centrales solares de torre, los discos parabólicos, receptores lineales de Fresnel...



Imagen 6 Instalación de alta temperatura. Central solar de torre.

1.3. Situación española

Como se ha mencionado anteriormente, los niveles de radiación solar varían en función de la posición geográfica entre otros factores. Esto hace que España disponga de los mayores niveles de irradiación anual de Europa (kWh/m^2) (1) (Imagen 7):

- Berlín: 1009 kWh/m²
- París: 1112 kWh/m²
- Madrid: 1553 kWh/m²

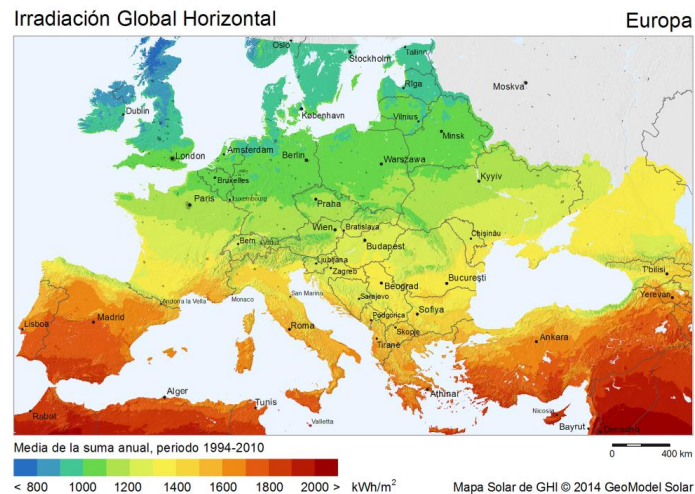


Imagen 7 Irradiación solar en Europa

España tiene un amplio potencial de desarrollo de energía solar térmica, con una media de 2.500 horas de sol al año (Imagen 8), además de poca nubosidad, baja humedad ambiental y clima seco, hace que España tenga unos óptimos valores de radiación directa (3).

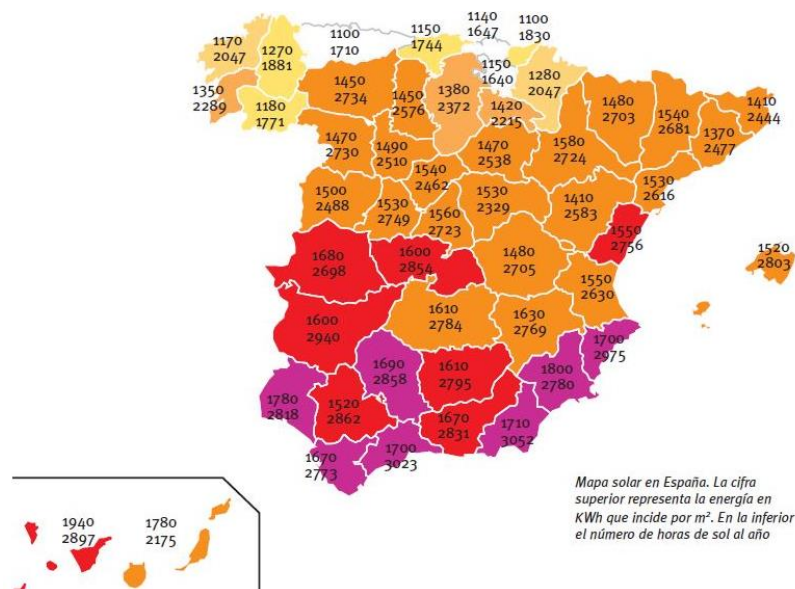


Imagen 8 kWh/m² y horas de sol al año (3)

Sin embargo, la situación de España en Europa en 2015 en cuanto a producción de GW por energía solar era bastante menor que otros países como Alemania, cuya posición geográfica no es tan favorable.

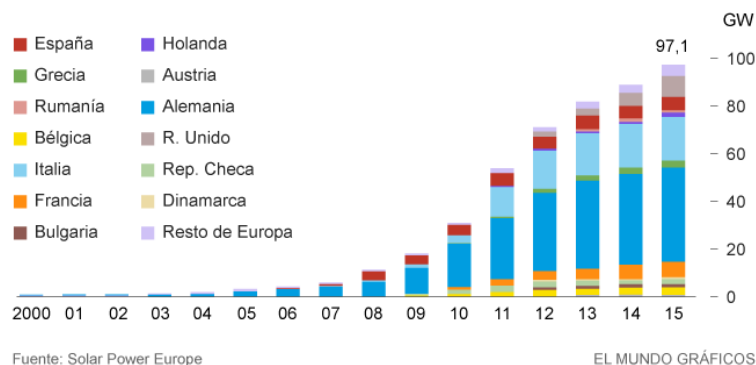


Imagen 9 Evolución de GW de energía solar por países

En lo respectivo a la energía fotovoltaica en particular, según los datos registrados por UNEF (Unión Española Fotovoltaica), en 2018 se instalaron en España 261,7 MW de potencia fotovoltaica. Esto implica un incremento del 94% con respecto a 2017 (135 MW) y un importante crecimiento respecto a 2016 (55 MW) y 2015 (49 MW). De estos 261,7 MW, un 90% (235,7 MW) corresponde al autoconsumo energético. Un 25% de éstos relativos a autoconsumo conectado a red para uso agrícola y 26 MW a plantas solares fotovoltaicas sobre suelo.

Dentro de España, Andalucía dispone de los valores mayores de irradiación anual sobre superficie horizontal. Esta situación favorable hace que disponga de instalaciones fotovoltaicas, centrales termosolares y una importante superficie instalada de captadores de energía solar térmica:

	TERMOSOLAR (MW)	E.S. TÉRMICA (M ²)	FOTOVOLTAICA (MWP)	IRRADIACIÓN ANUAL (KWH/M ²)
ALMERÍA		81.978	86,5	1700
CÁDIZ	100	172.424	74,72	1848
CÓRDOBA	299,8	49.100	195,71	1575
GRANADA	149,7	48.428	98,89	1402
HUELVA		85.054	73,65	1744
JAÉN		27.170	91,98	1612
MÁLAGA		208.069	53,63	1689
SEVILLA	447,9	378.422	222	1599
ANDALUCÍA	997,4	1.050.646	897,08	

Tabla 1 Situación de la energía solar en Andalucía 2018 (2)

Gracias a la instalación de este millón de metros cuadrados de captadores solares térmicos la *Agencia Andaluza de la Energía* calcula que se evita la emisión de unas 223 000 toneladas de CO₂ a la atmósfera, el equivalente a retirar de la circulación a 106 000 vehículos.

2 AGUA CALIENTE SANITARIA

Ya en la antigüedad se inventaron métodos para la obtención de agua caliente. Las termas romanas disponían de un sistema de tal forma que sus usuarios pudieran disfrutar de baños calientes. El historiador griego Herodoto narra como se vertía agua en las piedras previamente calentadas.

Acorde con el desarrollo de los sistemas de confort y el uso generalizado de la calefacción y el Agua Caliente Sanitaria (ACS), desde principios de los años ochenta la energía solar térmica ha venido siendo usada de forma activa en España, mediante el empleo de captadores solares térmicos (5).

La tecnología referente a la obtención de ACS ha ido evolucionando. Este proyecto se centrará en una instalación solar térmica de baja temperatura de uso habitual, con el fin de obtención de ACS para el consumo humano. El esquema general de una instalación de ACS es el siguiente:

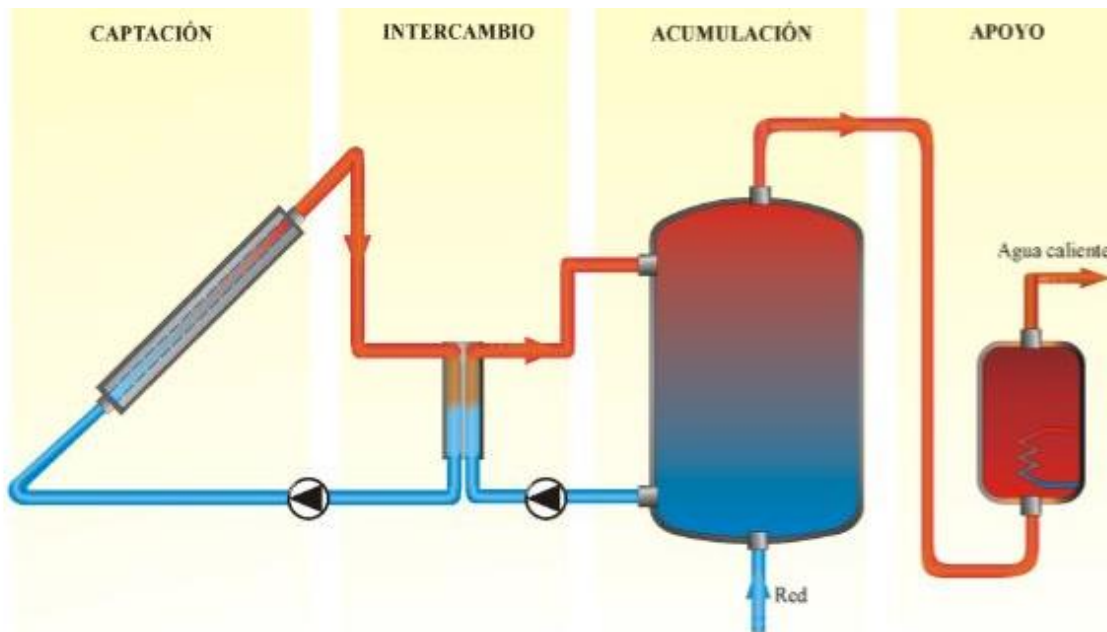


Imagen 10 Esquema general de ACS

Se distinguen los subsistemas:

1. Subsistema de captación. Formado por los captadores solares.
2. Subsistema de intercambio. Transfiere calor desde el circuito de colectores hasta el de acumulación.
3. Subsistema de acumulación. Depósitos de conectados en serie.
4. Subsistema de apoyo. En caso de no obtener la energía térmica requerida.

También se encuentra un subsistema de control, por el que se controlan las diferencias de temperaturas y ponen en marcha y paran la instalación.

A continuación, se hablará de las partes más representativas de este esquema y de la tipología que se puede encontrar en un mercado habitual.

2.1. Captador solar

Es el elemento más importante y representativo de estas instalaciones. Se trata de un intercambiador que transforma la energía radiante en energía térmica. La incidencia del sol hace que aumente la temperatura del fluido calorportador de trabajo que se encuentra en el interior del captador, es frecuente el uso de agua glicolada.

Este fluido calorportador será impulsado por una bomba a un intercambiador, donde calentará el agua que proviene del depósito de acumulación y será devuelto a éste a una mayor de temperatura.

Los captadores o colectores solares están formados por tuberías, un marco, superficie absorbente, caja, ... Todo esto variará en función de la tipología escogida de cada uno de los elementos.

2.1.1. Tipología

En primer lugar, se puede diferenciar entre captadores vidriados y no vidriados. Los no vidriados son aquellos que no presentan cubierta que aisle al captador plano del exterior, por lo que las pérdidas serán muy elevadas, su uso es habitual para aplicaciones de muy baja temperatura, como es el calentamiento de piscinas al aire libre. Se pueden encontrar como mantas de polipropileno (1).

Mientras que los vidriados presentan una cubierta que propicia que se produzca en su interior un efecto invernadero, por lo que el coeficiente de pérdidas será menor y será usado en aplicaciones de mayor demanda de nivel energético. Entre éstos se encuentran los tubos de vacío, los CPC y los captadores solares planos (1).

2.1.1.1. Tubos de vacío

- Heat Pipe
- Flujo directo
- Sydney
- Schott

2.1.1.2. Captadores CPC

Poseen una serie de tubos de cristal en paralelo, por los que circula el fluido de trabajo. Se encuentran sobre un reflector de forma cilíndrica que concentra los rayos solares sobre el tubo, tal como se muestra en la Imagen 11.

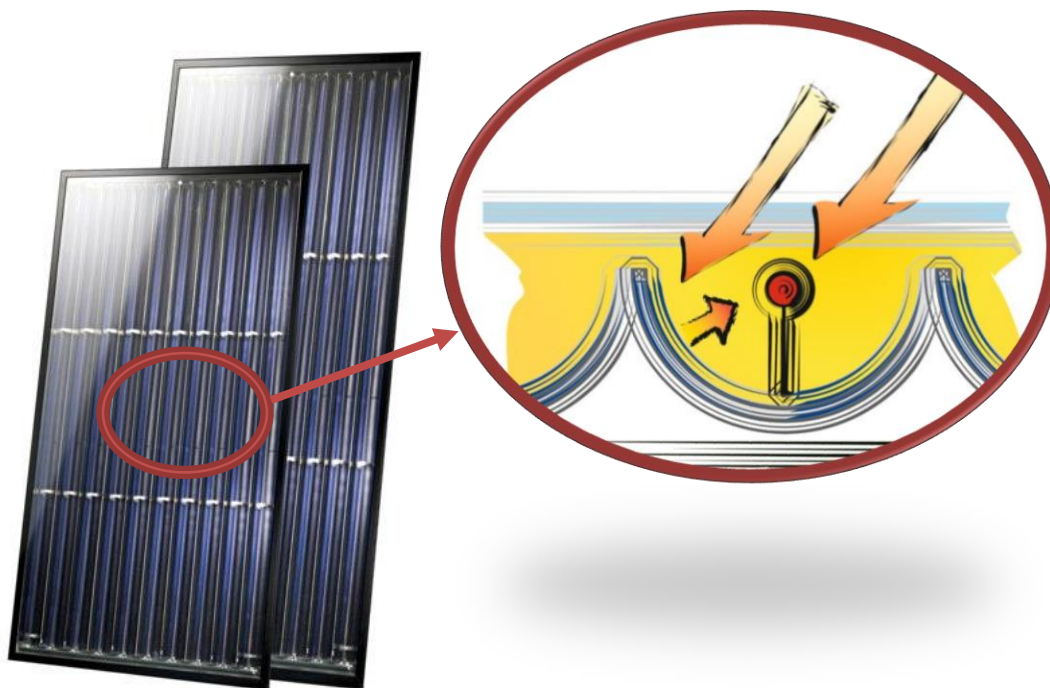


Imagen 11 Captador CPC

2.1.1.3. Captadores planos

Los sistemas de captación planos con cubierta de vidrio son más comunes en producción de ACS, puesto que el vidrio dejaría pasar los rayos que calentarían los tubos metálicos que portan el fluido calorportador (Imagen 12). Será más favorable los tubos de color oscuro, ya que se calentarán más. Además, el vidrio que cubre el captador protege la instalación y permite conservar el calor produciendo un efecto invernadero que permite mejorar el rendimiento del captador. Los colectores planos no sólo captan la radiación directa, sino también la difusa. Esto implica que puede trabajar en días nublados, siempre que la irradiación total no caiga por debajo de ciertos límites.

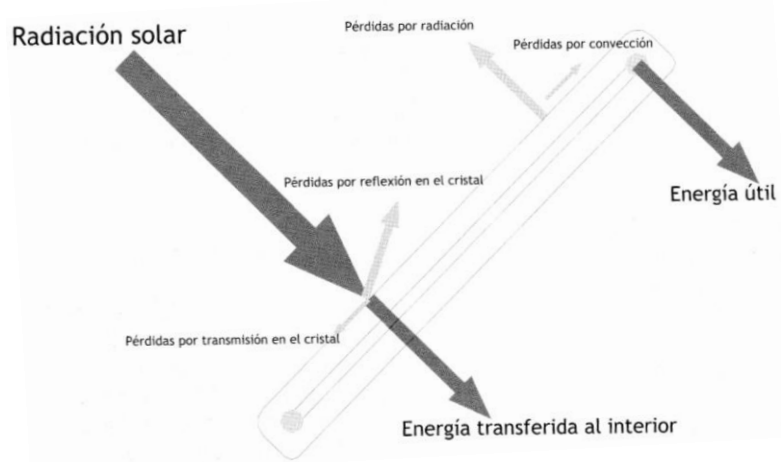


Imagen 12 Balance en captador solar plano (1)

Las temperaturas requeridas son del orden de 40-50 °C.

Principales componentes

Cubierta: Elemento de material transparente para la radiación solar incidente y opaco para a la radiación de onda emitida por el absorbedor, de esta forma se consigue el efecto invernadero. Suele usarse de vidrio frente a cubiertas plásticas. La mayor parte de los fabricantes emplean cristales templados de bajo contenido en hierro.

Aislamiento: Su fin es reducir las pérdidas al exterior. Se coloca en los laterales y en el fondo de la carcasa, es decir, aquellas zonas que no necesitan ser transparentes a la radiación. Suele estar constituido de lana mineral, espumas de poliuretano o fibra de vidrio.

Para elegir un aislamiento hay que consultar: el coeficiente de aislamiento y temperatura de trabajo máxima.

Absorbedor: Es el elemento encargado de recoger la radiación solar y transferir el calor al fluido de trabajo. El calorportador debe estar confinado en el interior del captador. Lámina metálica o varias aletas adheridas. Suele ser de cobre con algún tipo de tratamiento (pintura negra) con el objetivo de mejorar las prestaciones. En el caso de recurrir al aluminio es necesario emplear un inhibidor de los iones cobre y hierro. El más habitual es el de parrilla, constituido por varias tuberías paralelas.

Caja o carcasa: Contiene los elementos del captador que suele ser de aluminio o acero galvanizado, de un material que soporte la acción de agentes atmosféricos y la radiación solar. Suele incluir un marco.

Canal de aire: Es un espacio que se encuentra entre la cubierta y el absorbedor. Su espesor será calculado considerando las pérdidas por convección y las altas temperaturas que se pueden alcanzar en dicho espacio.

En la siguiente imagen aparecen representados los componentes principales:

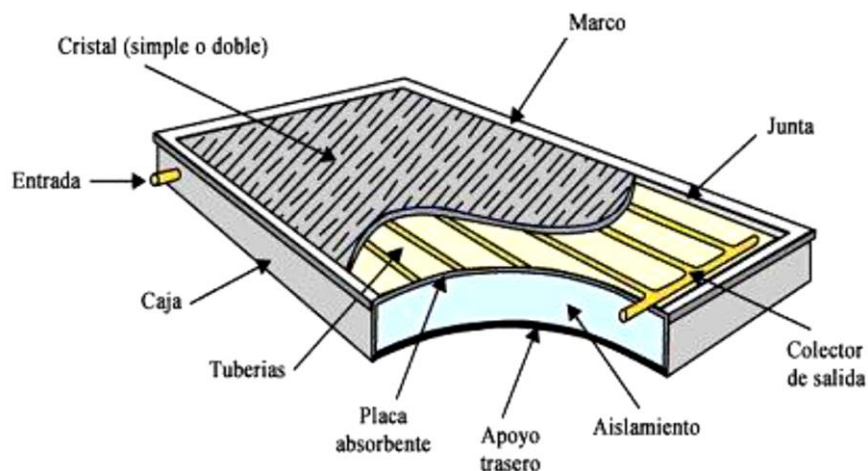


Imagen 14 Partes del captador solar

Clasificación general de los captadores:

Número de cubiertas	Material de la cubierta	Tipo de superficie absorbente
<ul style="list-style-type: none"> • Sin cubierta • Una cubierta • Varias cubiertas 	<ul style="list-style-type: none"> • Vidrio • Plástico 	<ul style="list-style-type: none"> • Selectiva • Negra
Material de la superficie absorbente	Fluido de trabajo	Configuración de la superficie absorbente
<ul style="list-style-type: none"> • Cobre • Acero • Aluminio • Caucho 	<ul style="list-style-type: none"> • Captadores de agua • Captadores de aire 	<ul style="list-style-type: none"> • Serpentin (Imagen 15) • Parrilla (Imagen 15) • Placa

Imagen 13 Clasificaciones de captadores solares planos

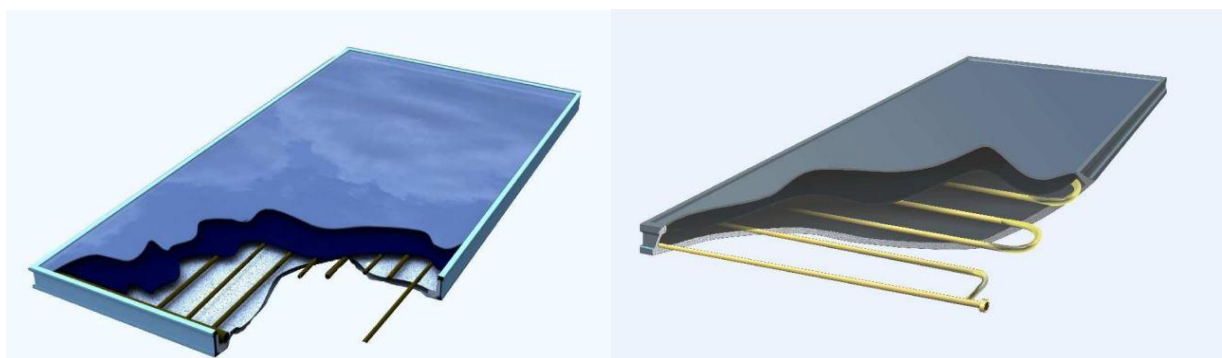


Imagen 15 Captador con absorbedor tipo parrilla y serpentín

Algunos ejemplos que se pueden encontrar más habitualmente en el mercado:

Plano: Se produce el efecto invernadero en la superficie cerrada de captación, anteriormente explicada. La superficie absorbedora se trata de un vidrio seguido de capas opacas y una capa metálica unidas a los conductos por los que fluyen el fluido calorportador, pudiendo ser agua o glicol.

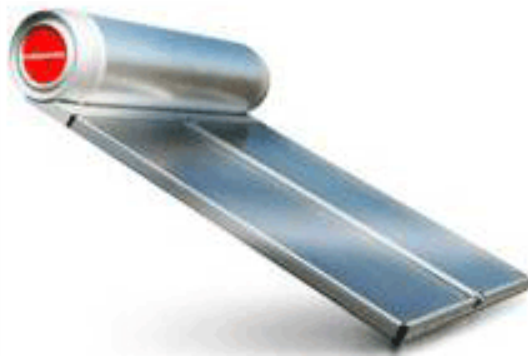


Imagen 16 Captador plano

Tubos al vacío: Se absorbe el calor en el interior de los cilindros al vacío.

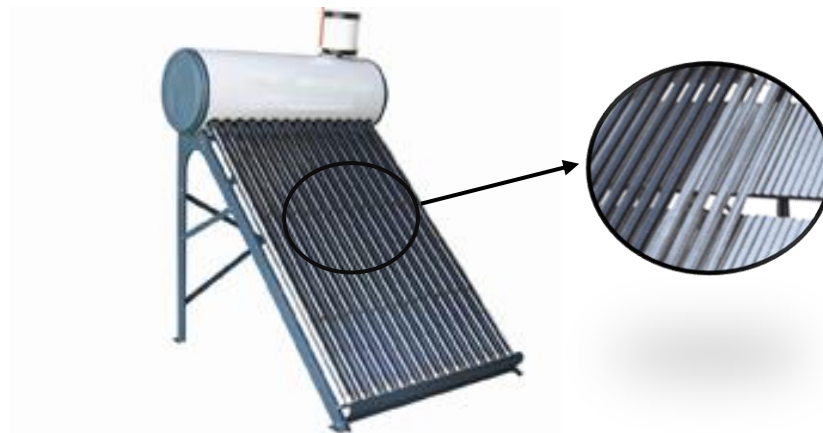


Imagen 17 Captador con tubos al vacío

Pérdidas por orientación, inclinación y sombras

El *Documento Básico HE Ahorro de Energía* define las pérdidas como porcentaje de radiación solar que incide sobre la superficie de captación orientada al sur, con inclinación óptima y sin sombras. Las pérdidas por orientación e inclinación y las totales deben ser inferiores a los límites expuestos en la tabla:

Caso	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	10 %	10 %	15 %
Superposición de captadores	20 %	15 %	30 %
Integración arquitectónica de captadores	40 %	20 %	50 %

Tabla 2 Pérdidas límites

Se considera como orientación óptima el sur y la inclinación óptima, dependerá del periodo de utilización:

- a) Demanda constante anual: la latitud geográfica.
- b) Demanda preferente en invierno: la latitud geográfica + 10°.
- c) Demanda preferente en verano: la latitud geográfica - 10°.

Rendimiento

El comportamiento del captador solar térmico se evalúa mediante la curva de rendimiento instantáneo, se puede hacer un ajuste lineal y cuadrático:

Lineal (Imagen 18): $\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{fe} - T_a)}{I}$

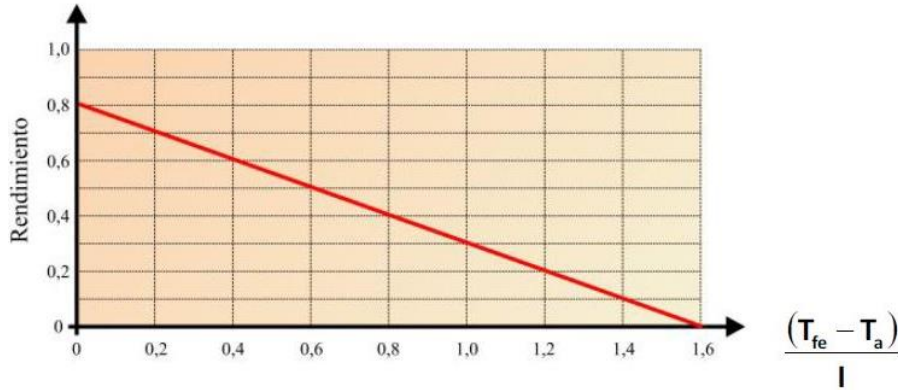


Imagen 18 Rendimiento de captador plano

Por tanto, el rendimiento máximo que se podrá obtener rondará el 80 %, dependerá del captador seleccionado, pues tendrá como máximo rendimiento el valor de $F_R(\tau\alpha)$, y dicho rendimiento tendrá una dependencia de:

- Condiciones ambientales: Temperatura ambiente (T_a), radiación (I).
- Condiciones operacionales: Temperatura del fluido entrada (T_{fe}).
- Captador solar: $F_R(\tau\alpha)$, $F_R U_L$.

Se deduce que si aumenta T_{fe} , disminuirá el rendimiento, a diferencia de que si aumenta T_a y I aumentará el rendimiento.

Si se desea un ajuste más preciso se recurre al ajuste cuadrático:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_0 \frac{(T_{fe} - T_a)}{I} - F_R U_1 \frac{(T_{fe} - T_a)^2}{I} = a_0 - a_1 \frac{(T_{fe} - T_a)}{I} - a_2 I \left(\frac{(T_{fe} - T_a)}{I} \right)^2$$

2.2. Acumulador

Debido a que existe un desfase entre la radiación solar y el consumo es necesaria la existencia de un acumulador de energía. Se pretende almacenar la energía solar para poder satisfacer la demanda posteriormente, en el caso de las instalaciones de ACS se utiliza agua como medio de acumulación. Debe presentar como requisitos:

- Pérdidas térmicas bajas
- Calor específico elevado del medio de acumulación
- Buena estratificación de temperaturas en el acumulador
- Vida útil equivalente a la del captador solar
- Bajo coste y disponibilidad del medio de acumulación
- Buenas propiedades medioambientales y de higiene del medio de acumulación y del acumulador
- Capacidad de soportar las temperaturas y presiones de trabajo

El acumulador posee una salida para el agua fría que pasará al intercambiador, donde aumentará su temperatura

gracias al fluido calorportador proveniente del captador.

2.2.1. Tipología

Existe una gran clasificación según la función, material, posición de intercambiador, ubicación del depósito, ... (Imagen 19).

SEGÚN LA FUNCIÓN DEL DEPÓSITO:

- Acumulador solar de ACS:

Debe ser resistente a la corrosión.

La presión de trabajo es igual a la de suministro del agua de red.

- Acumulador de precalentamiento solar.
- Acumulador del sistema convencional.
- Acumulador de inercia:

Es empleado en grandes instalaciones.

Es independiente del circuito de ACS.

Trabaja encircuito cerrado, por lo que es menos exigente en cuanto a la protección frente a la corrosión.

Presión de trabajo es independiente de la presión del agua de red.

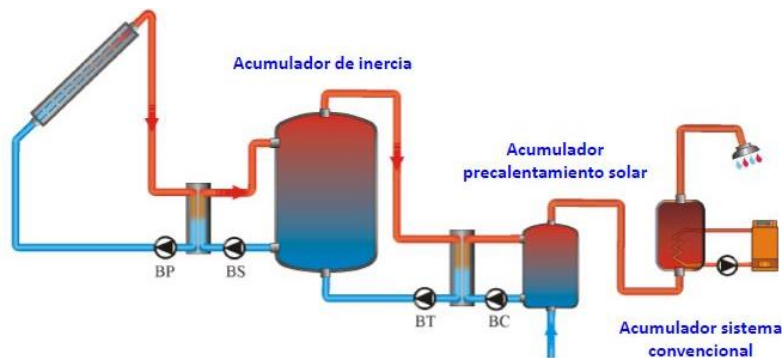


Imagen 19 Acumuladores en instalación de ACS

SEGÚN EL SISTEMA DE INTERCAMBIO:

Según la transferencia de calor al agua de consumo se puede clasificar en directo e indirecto, y dentro de éste último se diferencia entre tipo serpentín y doble envoltente, como se muestra en la siguiente imagen:

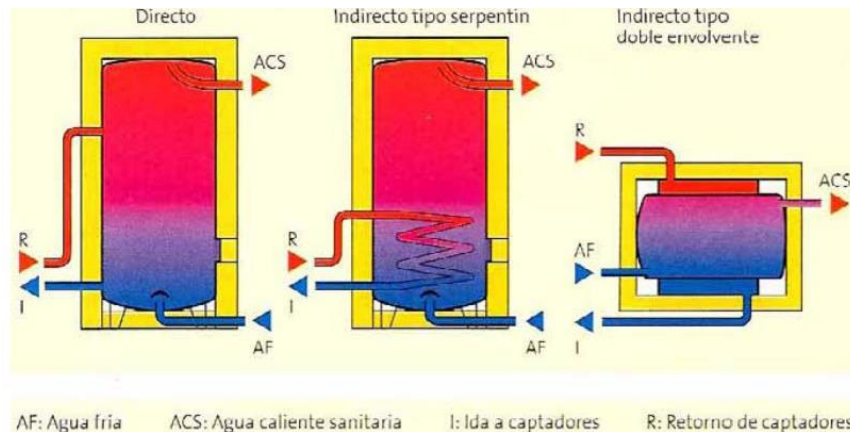


Imagen 20 Tipología según sistema de intercambio

- Directo: La transferencia es directa, siendo el fluido de los colectores el agua de consumo. Tiene un alto rendimiento, pues de los paneles el agua va directa para el consumo, sin embargo, el sistema sufre mayor deterioro, debido a las corrosiones, heladas, presiones elevadas en colectores, ... Hay que tener en cuenta de que el agua de la red tiene un gran contenido de aire disuelto, y el oxígeno es uno de los mayores responsables de la corrosión. Para prevenir la congelación del agua por el ambiente exterior hay que instalar un sistema de protección antiheladas.
- Indirecto: El fluido de trabajo que circula por los captadores se mantiene en un circuito independiente. Al introducir un intercambiador se produce una pérdida de rendimiento. A diferencia de los directos, no hay que preocuparse de la congelación del agua, basta con que se usen líquidos en el circuito primario con menor punto de congelación que la temperatura ambiente de la zona, por ejemplo, agua glicolada.
 - Tipo serpentín: Son los más habituales. El circuito primario pasa en forma de serpentín por el acumulador, donde se produce la transferencia de calor al agua del circuito secundario. Se puede encontrar un acumulador de doble serpentín (Imagen 21), donde el segundo serpentín es una fuente de apoyo para el calentamiento de agua.



Imagen 21 Doble serpentín

- Tipo doble envolvente. El fluido calentado en los colectores rodea al agua que consumirá el usuario separados por una pared, mostrado en la siguiente imagen:



Imagen 22 Doble envolvente

SEGÚN EL MATERIAL:

La característica más importante para la selección de un acumulador es el material con el que está fabricado, siendo los más destacados:

- Acero inoxidable: Buen comportamiento a corrosión. Soportan temperaturas elevadas. Coste elevado.
- Acero con esmalte vitrificado: Buen comportamiento a corrosión interior. Soportan temperaturas elevadas. Generalmente para pequeños volúmenes.
- Acero galvanizado: Los más utilizados. Temperatura inferior a 60 °C.
- Acero revestido de plástico: Revestimiento de duroplásticos, termoplásticos o caucho. Buen comportamiento a corrosión interior. Temperaturas inferiores a 85 °C.

SEGÚN LA UBICACIÓN:

Se pueden clasificar en centralizado e individual, tal y como queda representado en la Imagen 23.

- Centralizado: Un solo acumulador, y este se divide en los distintos puntos de consumo. Cuando se trata de instalaciones ubicadas en edificios de viviendas para uso residencial presenta los problemas de repartir gastos entre los miembros de la comunidad, distinguir que gasto de agua caliente proviene de energía solar o de la convencional, lo que conlleva la instalación de contadores (de caudal o potencia), el gran espacio necesario para el acumulador y la caldera, además, el hecho de que esté centralizada, y, por tanto, compartida puede llevar pérdida de confort para el usuario individual.

Es un sistema óptimo para edificios de terciario, como hoteles en los que prima el espacio y la centralización de las instalaciones.

- Individual: Hay tantos acumuladores como puntos de consumo existen. El trazado de la red será más sencillo que el centralizado y en viviendas de uso intermitente es una solución óptima. Presenta como desventaja que los fluidos se transportarán a altas temperaturas, por lo que la red sufrirá más.

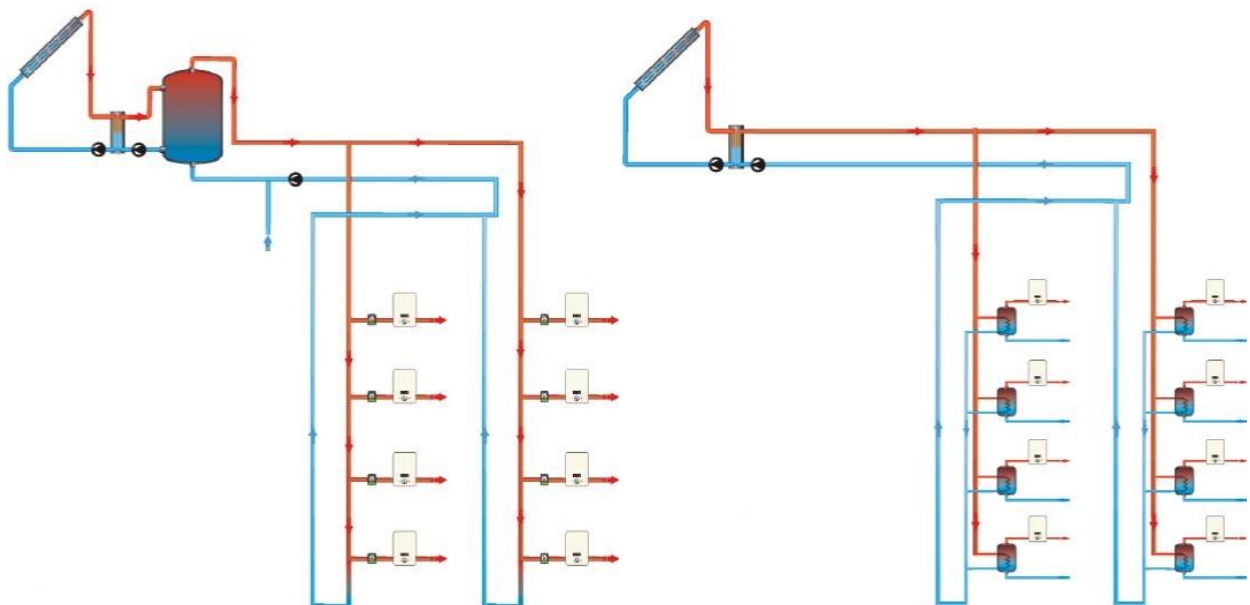


Imagen 23 Centralizado e individual

2.3. Circulación

Según el tipo de circulación se puede clasificar en:

Termosifón

Forzada

Termosifón:

El movimiento se produce por variaciones de densidad del fluido, consecuencia de la variación de temperatura, es decir, por convección natural. El fluido de los captadores eleva su temperatura, al estar expuesto a la radiación solar, por lo que baja su densidad. El fluido ascenderá al calentarse a la parte alta del circuito, mientras que el fluido frío contenido en el deposito de acumulación, con mayor densidad se desplaza hacia la parte baja de la instalación por la tubería de entrada a los colectores.

El fluido circulará cuando exista un gradiente de temperaturas, por lo que la fuerza que impulsa la circulación es pequeña, esto lleva a tener especial atención en el diseño de la instalación para favorecer la circulación (Imagen 24).

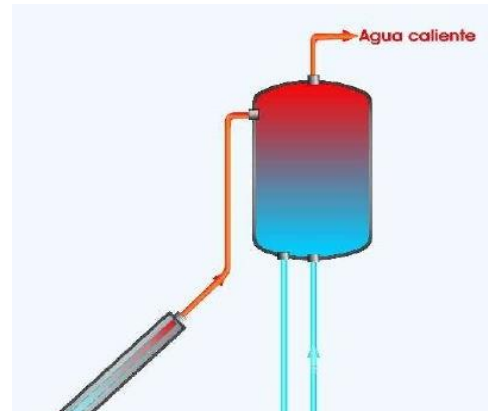


Imagen 24 Termosifón

Forzada:

El fluido se mueve gracias a una bomba, de esta forma se vence las pérdidas de carga del circuito (Imagen 25). El caudal normalmente se encuentra en el doble que los de termosifón, por lo que los saltos de temperatura en este tipo de sistema suelen ser de unos 5°C . Se debe activar la bomba cuando se pueda aumentar la temperatura en el acumulador, se trata de una regulación del sistema por medios de un control diferencial de temperaturas por medio de la medición de las temperaturas de la parte inferior del depósito y la salida de colectores. Cuando la diferencia de temperatura sea superior a unos 6°C se accionará las bombas, y se pararán cuando la diferencia de temperatura de las sondas de medición sea de 3°C .

Con este sistema se puede controlar la temperatura máxima que se alcanza en el depósito, y así se pueden detener las bombas para evitar que se alcance en el interior una temperatura demasiado elevada.

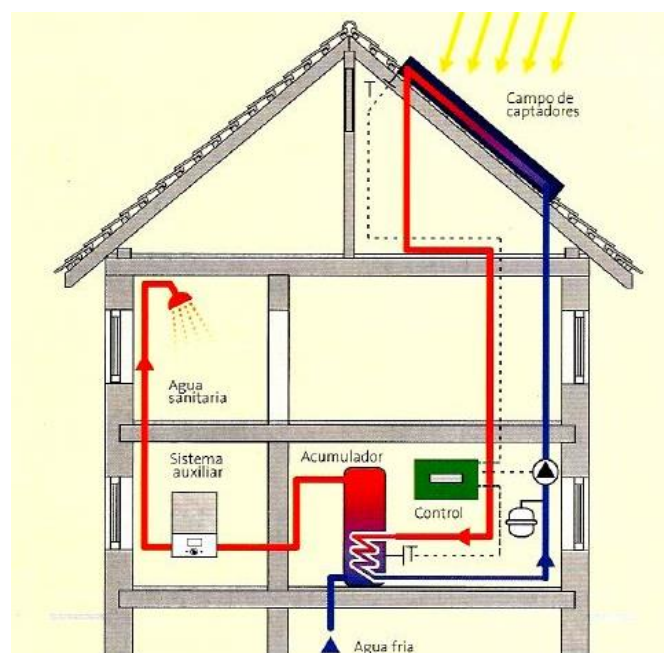


Imagen 25 Circulación forzada

2.4 Sistema hidráulico

El sistema hidráulico está formado por circuitos de captación (primario) y de consumo (secundario), ambos constituidos por válvulas, tuberías, bombas, vasos de expansion, etc.

El diseño hidráulico correcto desde el sistema de captación hasta el sistema de acumulación es clave para un buen funcionamiento del sistema. Algunos criterios que se siguen:

- Caudal portador: Será de acuerdo con las especificaciones del fabricante. En su defecto el valor estará entre 1,2 l/s y 2 l/s por cada 100 m² de red de captadores. En las instalaciones con captadores estén conectados en serie, el caudal se obtendrá con el criterio anterior y dividiendo el resultado por el número de captadores conectados en serie (6).
- Circuito equilibrado.
- Circuito seguro. Existen variaciones de presión y temperatura que pueden ser importantes.

Una forma de equilibrado del circuito es mediante el **retorno invertido**, en el que se dirige el fluido frío hasta el colector más lejano, y entonces distribuir al resto de captadores por la parte más baja, representado en la siguiente imagen.

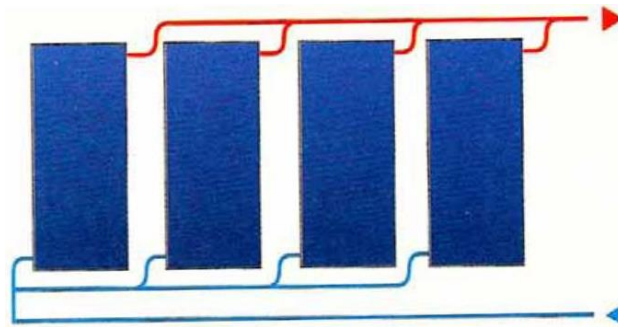


Imagen 26 Retorno invertido

Disposición de captadores

Según la disposición de los captadores pueden ser en serie, en paralelo o una combinación de ambos.

- Paralelo: Esta configuración unida al retorno invertido hace que todos los colectores funcionen de forma similar (Imagen 27). Existe el inconveniente de que exista un número limitado aconsejado por el fabricante, principalmente por la pérdida de carga.
- Serie: El fluido entra en un captador, eleva su temperatura y posteriormente pasará al siguiente captador con una temperatura de entrada que será la de salida del captador anterior (Imagen 27). El rendimiento de esta configuración será menor, sin embargo, el coste será menor, pues el recorrido del fluido será menor, por consiguiente, la longitud de las tuberías, además, habrá un menor caudal del fluido calorportador, lo que implica menor diámetro y bombas de menor tamaño. Todo esto conlleva un menor mantenimiento, por lo que se reducirá el coste de éste.
- Mixto: Es una combinación de ambos y es poco habitual su uso (Imagen 28).

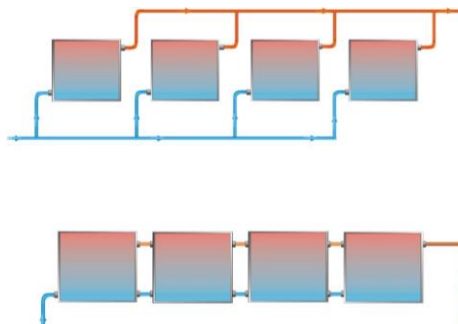


Imagen 27 Configuración paralela (superior) y en serie (inferior)

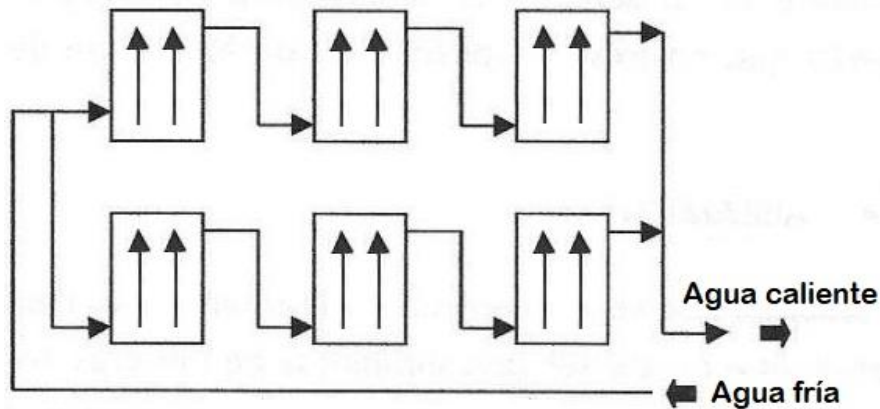


Imagen 28 Configuración serie-paralelo

2.4.1. Circuito primario

Se va a describir cada elemento presente en la siguiente imagen que representa al circuito primario, a excepción del captador ya explicado anteriormente. El circuito primario es por el que circula el fluido calorportador. En la siguiente imagen queda representado un circuito primario de una instalación con un interacumulador de serpentín simple.

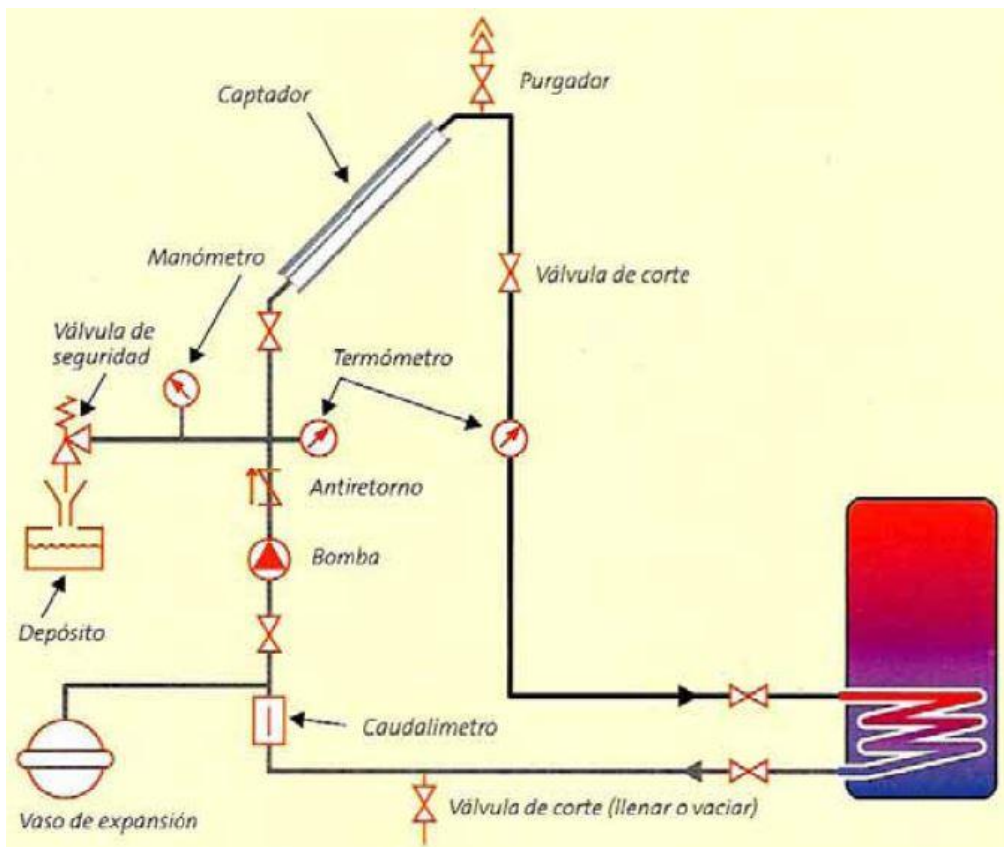


Imagen 29 Circuito primario

Tuberías

El sistema de tuberías y sus materiales no deben permitir la posibilidad de formación de obturaciones o depósitos de cal para las condiciones de trabajo. Para evitar pérdidas térmicas, la longitud de las tuberías del sistema debe ser lo más corta posible, evitando al máximo los codos y pérdidas de carga en general. Los tramos horizontales

tendrán una pendiente mínima del 1% en el sentido de la circulación (6).

Los materiales del circuito primario pueden ser acero inoxidable o cobre, con uniones roscadas y protección exterior con pintura anticorrosiva.

En el circuito secundario o de servicio de agua caliente sanitaria podrá utilizarse cobre, acero inoxidable y materiales plásticos. Éstos últimos se usarán siempre que soporten las temperaturas máximas del circuito y está autorizado por la compañía de suministro de agua.

Sistema de expansión

El fluido calorportador que circula por el circuito primario en la instalación está sometido a grandes variaciones de temperatura. Estas variaciones de temperatura hacen que varíe el volumen del fluido. Los vasos de expansión preferentemente se conectarán en la aspiración de la bomba.

Los vasos de expansión son un elemento de seguridad que absorbe los aumentos de volumen que vienen provocados por la subida de temperatura del fluido calorportador. De esta forma mantiene la presión, puesto que si no fuera de esta forma se podrían producir la rotura de algún componente.

Se pueden encontrar el sistema de expansión abierto o cerrado:

- Abierto: El fluido del circuito primario está comunicado con la atmósfera. Se debe situar a una altura superior a la del punto más alto del circuito primario solar. La altura en la que se situarán los vasos de expansión abiertos será tal que asegure el no desbordamiento del fluido y la no introducción de aire en el circuito primario (6).
- Cerrado: El fluido del primario está separado de la atmósfera físicamente. El vaso en su interior tiene una membrana elástica que tiene a un lado el fluido y al otro un gas a cierta presión, de forma que cuando el fluido se enfría su densidad, y, por tanto, su volumen disminuye y este gas ejerce contrapresión. Es de uso común el vaso de expansión cerrado, ya que el abierto, aunque está permitido por el CTE no es recomendable (4).

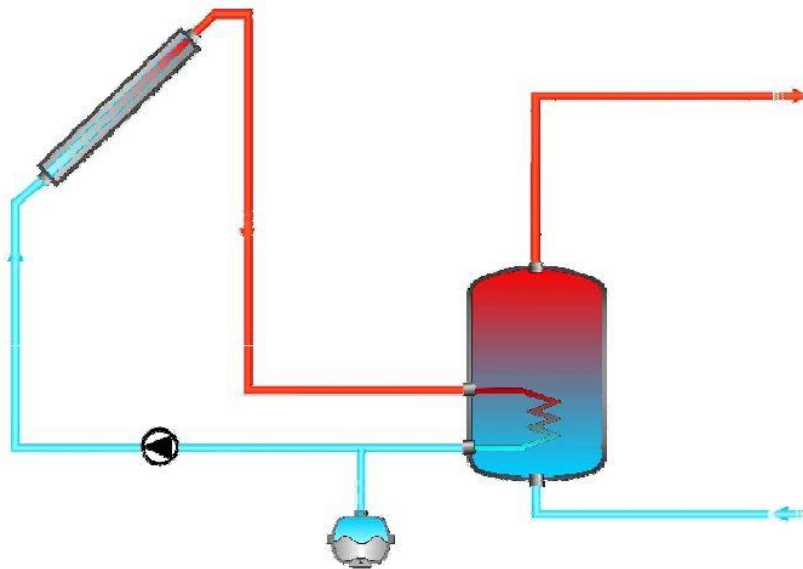


Imagen 30 Instalación con vaso de expansión cerrado (4)

Los circuitos con vasos de expansión cerrado deben llevar un sistema de llenado que permitan llenar el circuito y mantenerlo presurizado. Es conveniente hacerlo por la parte inferior del circuito, como se representa en la imagen anterior.

Bombas

La instalación de una bomba en el circuito primario tiene como fin que la caída de presión sea relativamente baja en todo el circuito. Se recomienda, si es posible, la instalación de las bombas en las zonas más frías del circuito, si no se produce cavitación y se mantiene en horizontal el eje de rotación (6). Se aconseja la instalación

de éstas en tramos verticales, de forma que se impida la formación de bolsas en el interior de las mismas.

El *CTE* afirma que para instalaciones superiores a 50 m² se montarán dos bombas idénticas en paralelo, dejando una de apoyo, tanto en el primario como en el secundario.

Purga de aire

Se establece en los puntos altos de la salida de captadores y en aquellos puntos donde pueda quedar aire acumulado. El *CTE* establece que se colocarán sistemas de purgas constituidos por botellines de desaireación de volumen útil superior a 100 cm³ y purgador manual o automático.

Drenaje

Los conductos se diseñarán de forma que se evite la congelación (6).

Válvulas

Según el *Documento Básico HE 4 - Ahorro de Energía* la selección de válvulas se realizan en función del papel a desarrollar y de la presión y temperaturas extremas que pueden encontrar, siendo los criterios:

Aislamiento	Válvulas de esfera
Equilibrado de circuitos	Válvulas de asiento
Vaciado	Válvulas de esfera o macho
Llenado	Válvulas de esfera
Purga de aire	Válvulas de esfera o macho
Seguridad	Válvulas de resorte
Retención	Válvulas de disco de doble compuerta, o de clapeta

Tabla 3 Válvulas según función

- Válvulas de corte:

Se instalarán válvulas de corte para facilitar la reparación o sustitución de algún componente o tramo dañado sin tener que realizar un vaciado completo de la instalación.

Deben instalarse de forma que se puedan aislar los captadores, intercambiador, acumulador y bombas. Se instalarán a la entrada de agua fría y la salida de agua caliente del depósito de acumulación.

- Válvulas antirretorno:

Se colocan válvulas antirretorno después de las bombas, para evitar que el fluido circule en sentido contrario y resulte dañada.

- Válvulas de seguridad:

Se deben instalar válvulas de seguridad taradas a una presión que garantice que no se supere la presión máxima de trabajo de los componentes.

Sistema control

El sistema de regulación y control está tiene como fin aprovechar lo máximo posible la energía solar y evitar situaciones de riesgo para la instalación. El regulador ajusta la temperatura límite del circuito, y evita el congelamiento del fluido.

Se instalarán sensores de temperatura, que deberán estar aislados de la influencia de las condiciones ambientales. Las sondas serán de inmersión.

2.5. Sistema auxiliar

En la mayoría de los casos se da la situación de que no es suficiente la instalación de un Sistema de ACS, hay que instalar un apoyo para cubrir la demanda del usuario. Por ello, se recurre a la instalación de calderas, éstas calientan el agua sin necesidad del aporte de los captadores solares, y actuarán cuando funcionen a menor rendimiento. Los tres tipos de calderas fundamentales:

- Caldera estándar.

La temperatura de servicio está limitada por su diseño. Esta tipología solo cumple los requisitos mínimos de aprovechamiento energético, usando el calor de la combustión para calentar el agua:

- Provoca altas pérdidas energéticas en los gases de combustión.
- Puede resultar contaminante debido a las emisiones de NO_x y CO .
- El cuerpo de la caldera suele estar sobredimensionado.
- Funciona a temperatura constante, con temperaturas de impulsión próximas a 80°C .

- Caldera de baja temperatura.

Las calderas de calefacción de baja temperatura son aquellas que pueden funcionar de forma continua con temperaturas de retorno de entre 35 y 40°C . En las que pueden producirse, en algunas circunstancias, la condensación del vapor de agua contenido en los gases de combustión.

- Caldera de condensación.

Calderas de Condensación pueden condensar de forma permanente una parte importante del vapor de agua contenido en los gases de combustión. Aprovecha gran parte del calor latente de los humos.

En cuanto a los rendimientos quedan plasmados en la siguiente imagen en función de la potencia. Quedan más detallados con temperaturas comunes e intervalos de potencias en la siguiente tabla, extraída del Real Decreto 275/1995 que establece los requisitos de rendimiento aplicables a las calderas nuevas de agua caliente alimentadas con combustibles líquidos o gaseosos.

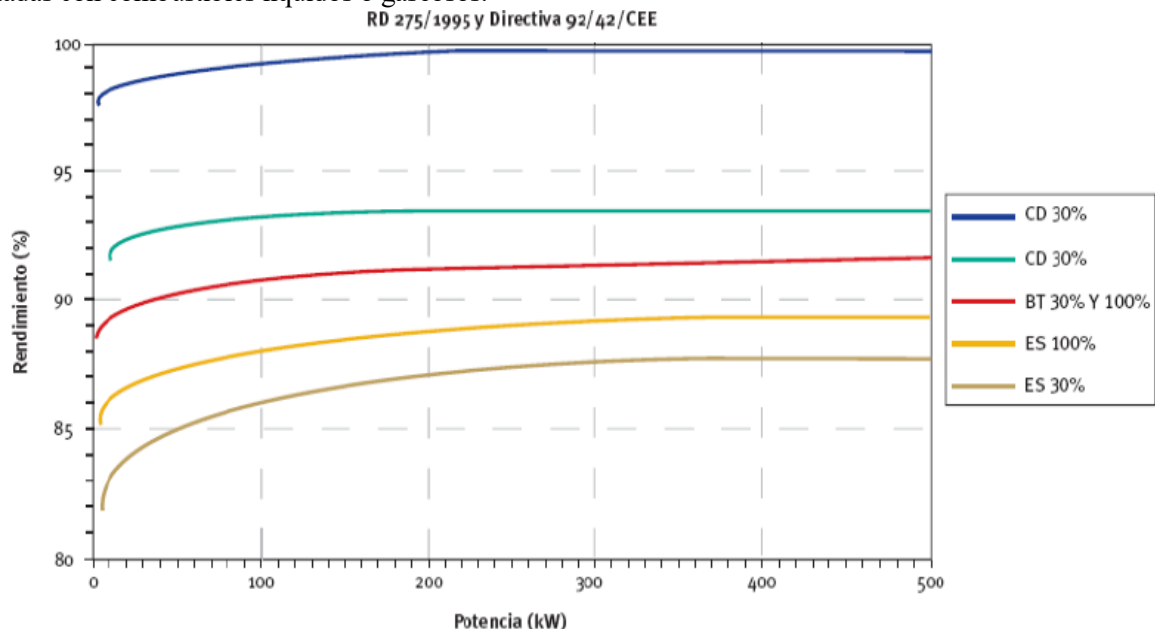


Imagen 31 Ábaco de rendimiento de calderas. RITE 2007

Siendo la imagen anterior:

- ES: Caldera estándar.
- BT: Caldera de baja temperatura.
- CD: Caldera condensación.

Según el Real Decreto 275/1995 los rendimientos útiles deberán cumplirse según la siguiente tabla:

TIPO DE CALDERAS	INTERVALOS DE POTENCIA (KW)	RENDIMIENTOS A POTENCIA NOMINAL		RENDIMIENTOS A CARGA PARCIAL	
		Temperatura media del agua en la caldera (°C)	Expresión rendimiento en porcentaje	Temperatura media del agua en la caldera (°C)	Expresión del requisito del rendimiento en porcentaje
ESTÁNDAR	4 – 400	70	$\geq 84 + 2\log P_n$	≥ 50	$\geq 80 + 3\log P_n$
BAJA Tª *	4 – 400	70	$\geq 87,5 + 1,5\log P_n$	40	$\geq 87,5 + 1,5\log P_n$
GAS DE CONDENSACIÓN	4 – 400	70	$\geq 91 + 1\log P_n$	30**	$\geq 91 + 1\log P_n$

Tabla 4 Rendimientos útiles según RD 275/1995

*Incluidas las calderas de condensación que utilizan combustibles líquidos.

**Temperatura del agua de alimentación de la caldera.

Combustibles:

- Gas Natural:

Es el denominado Gas Ciudad. La contaminación es baja y permite un funcionamiento muy eficiente de la caldera. El control no es tan preciso como la caldera eléctrica. Las calderas de gas calientan el agua al paso, por lo que no necesitan un segundo acumulador.

- Gasóleo:

Permite alcanzar altas temperaturas y un rendimiento óptimo de la caldera, sin embargo, es más contaminante que el gas natural. No existe red urbana, por lo que es necesario tener depósitos grandes de gasóleo de entre 500 y 2000 litros.

- Electricidad:

Las calderas eléctricas funcionan con una resistencia, por efecto Joule se transmite el calor al agua. Tiene un control más preciso que el resto de calderas, sin embargo, es más contaminante.

2.5 Otras aplicaciones del ACS

CALENTAMIENTO DE PISCINAS

El Documento Básico HE 4 - Ahorro de Energía refleja la contribución solar mínima de agua caliente para climatizaciones de piscinas cubiertas nuevas, piscinas cubiertas existentes en las que se renueve la instalación térmica o piscinas descubiertas existentes que pasen a ser cubiertas. El porcentaje mínimo que se debe de cubrir dependerá de la zona climática en la que se sitúe:

DEMANDA TOTAL PISCINAS CUBIERTAS	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
	30	30	50	60	70

Tabla 5 Porcentaje mínimo a cubrir en piscinas

Las temperaturas requeridas en piscinas dependen del uso, en caso de una deportiva 22 °C, mientras que las infantiles rondan 30 °C. Rodarán entre temperaturas bajas entre 20 °C y 30°C, por lo que se pueden utilizar

colectores de energía solar, con tratamiento de pintura negra cuando se trate de zonas de una buena condición de irradiación. Es frecuente el uso de captadores de polipropileno.

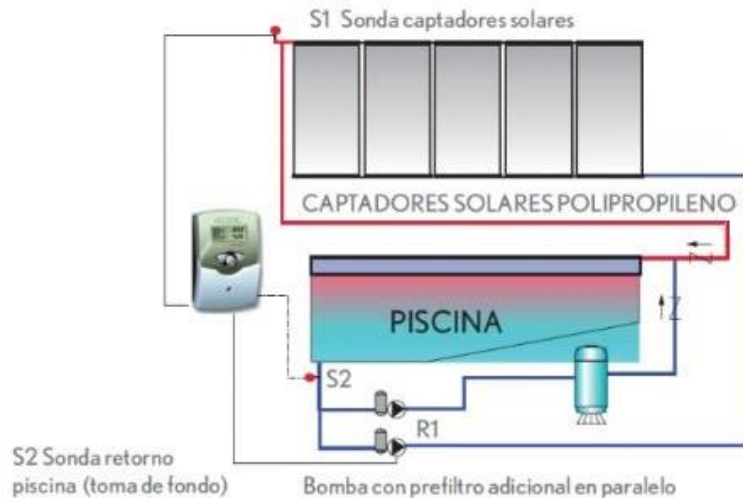


Imagen 32 Instalación de captadores solares para piscinas (6)

Este Sistema explotado correctamente puede suministrar toda la energía que se necesita para mantener la temperatura de la piscina dentro de un rango aceptable. El hecho de que la energía solar es gratuita y que no contamina hacen esta opción mucho más atractiva e interesante frente a los sistemas convencionales.

El sistema solar para calentamiento de piscina cuenta con los subsistemas comunes a los de ACS, como son los subsistemas de captación, intercambio y almacenamiento, que será la propia piscina (Imagen 32). El subsistema de control deberá activar y desactivar las bombas de circulación en función de la diferencia de temperaturas entre el campo de colectores y la sonda situada en la parte más baja de la piscina.

APOYO A LA CALEFACCIÓN

Es de uso habitual las calefacciones mixtas, dedicada al apoyo a la calefacción y a la producción de agua caliente sanitaria. Para el apoyo a la calefacción se puede usar los sistemas de calefacción por suelo radiante o por fancoil, lo que supone un gran ahorro en el gasto de combustible de la vivienda la configuración.

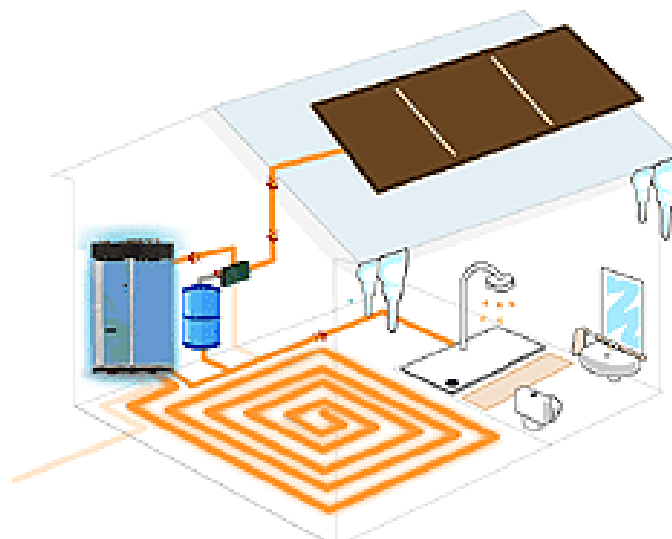


Imagen 33 ACS y suelo radiante

Hay que tener en cuenta que los requerimientos de temperatura de calefacción que pueden cubrirse con colectores planos no podrán ser superiores a los 45 °C o 50 °C (1).

Como se puede apreciar en la siguiente imagen este sistema contará los subsistemas:

- Subsistema de captación.

- Subsistema de intercambio calor.
- Subsistema de almacenamiento, constituido por un depósito de inercia.
- Subsistema de control para realizar de paradas y activaciones de la instalación en función del termostato diferencial y de máxima.
- Subsistema de apoyo auxiliar formado por una caldera o bomba de calor en caso de que la energía demandada sea superior a la ofrecida por el sistema de captación solar.

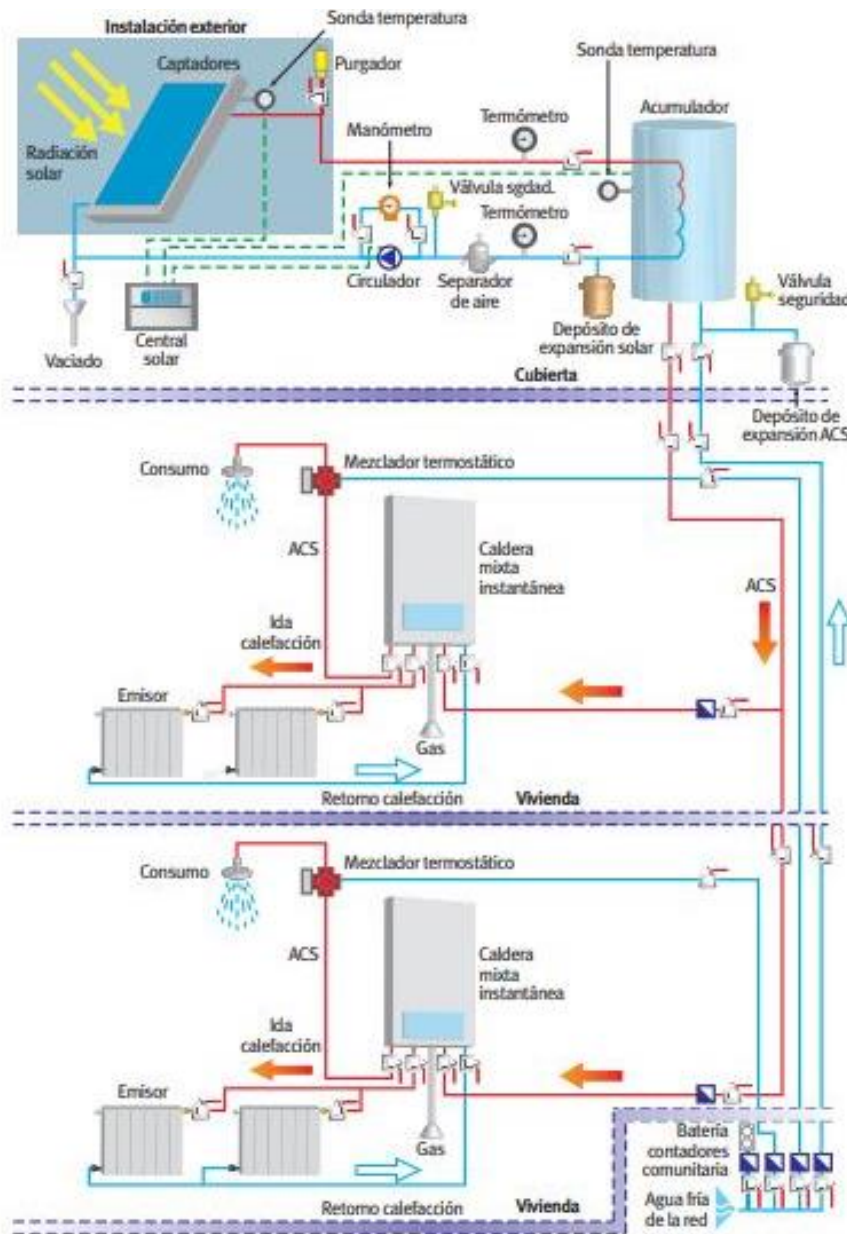


Imagen 34 Captador solar para ACS y calefacción (7)

APLICACIONES DE REFRIGERACIÓN

Existe el método de refrigeración por compresión y absorción. El sistema de refrigeración por compresión puede funcionar mediante la conversión de la energía solar a energía mecánica o eléctrica para hacer funcionar el compresor de un sistema convencional. El sistema de absorción utiliza la energía solar como fuente de energía térmica y resulta más económico y eficiente.

En un sistema por absorción se trabaja generalmente con mezcla de dos componentes en donde uno de fluido refrigerante y el otro simplemente sirve como medio de absorción del fluido refrigerante. Se recomienda el

empleo de sistemas solares con sistema de absorción con mezcla de bromuro de litio o amoníaco. El agua funcionará como refrigerante y el bromuro de litio como absorbedor.

En un ciclo convencional con compresor mecánico el fluido refrigerante en estado líquido circula por el evaporador, el medio a enfriar cede calor bajando su temperatura y el refrigerante se evapora. El vapor a baja presión fluye por el compresor e incrementa su presión y temperatura hasta que se licúa, de esta forma cede calor mediante el condensador y el refrigerante circula desde el condensador a un elemento de expansión donde bajará la presión y temperatura, y de esta forma se completa el ciclo.

Si se sustituye el compresor mecánico descrito por un sistema compuesto por un absorbedor y un generador, se obtiene un ciclo de refrigeración por absorción.

2.6 Mantenimiento

El *Documento Básico HE Ahorro de energía, HE 4* detalla el mantenimiento que se debe de seguir en este tipo de instalaciones con el fin de aumentar la fiabilidad y prolongar la duración de la instalación. Distingue entre el plan de vigilancia y el plan de mantenimiento preventivo.

Plan de vigilancia:

Operaciones que permiten asegurar que los valores operacionales de la instalación sean correcto, observando los parámetros funcionales principales. Además se vigilará la instalación para prevenir los daños producidos por posibles sobrecalentamientos.

ELEMENTO DE LA INSTALACIÓN	OPERACIÓN	FRECUENCIA (MESES)	DESCRIPCIÓN
CAPTADORES	Limpieza de cristales	A determinar	Con agua y productos adecuados
	Cristales	3	IV condensaciones en las horas centrales del día.
	Juntas	3	IV Agrietamientos y deformaciones.
	Absorbedor	3	IV Corrosión, deformación, fugas, etc.
	Conexiones	3	IV fugas.
	Estructura	3	IV degradación, indicios de corrosión.
CIRCUITO PRIMARIO	Tubería, aislamiento y sistema de llenado	6	IV Ausencia de humedad y fugas.
	Purgador manual	3	Vaciar el aire del botellín.
	Termómetro	Diaria	IV temperatura
CIRCUITO SECUNDARIO	Tubería y aislamiento	6	IV ausencia de humedad y fugas.
	Acumulador solar	3	Purgado de la acumulación de lodos de la parte inferior del depósito.

Tabla 6 Plan de observación

* IV: Inspección visual

Plan de mantenimiento:

Implican operaciones de inspección visual, verificación de actuaciones y otros. Ésto debe permitir mantener dentro de los límites las condiciones de funcionamiento, prestaciones, protección y durabilidad de la instalación.

El mantenimiento implicará, como mínimo, una revisión anual de la instalación para instalaciones con superficie de captación inferior a 20 m² y una revisión cada seis meses para instalaciones con superficie de captación superior a 20 m².

El plan de mantenimiento debe realizarse por personal técnico. La instalación tendrá un libro de mantenimiento en el que se reflejen todas las operaciones.

En el *Documento Básico HE Ahorro de energía, HE 4* se informa de la periodicidad y observaciones a realizar en relación con cada equipo. Existen tablas que describen las operaciones para el sistema de captación, sistema de acumulación, sistema de intercambio, circuito hidráulico, sistema eléctrico y de control y sistema de energía auxiliar.

EQUIPO	FRECUENCIA (MESES)	DESCRIPCIÓN
CAPTADORES	6	IV diferencias sobre original. IV diferencias entre captadores.
CRISTALES	6	IV condensaciones y suciedad
JUNTAS	6	IV agrietamientos, deformaciones
ABSORBEDOR	6	IV corrosión, deformaciones
CARCASA	6	IV deformación, oscilaciones, ventanas de respiración
CONEXIONES	6	IV aparición de fugas
ESTRUCTURA	6	IV degradación, indicios de corrosión, y apriete de tornillos
CAPTADORES	12	Tapado parcial del campo de captadores
CAPTADORES	12	Destapado parcial del campo de captadores
CAPTADORES	12	Vaciado parcial del campo de captadores
CAPTADORES	12	Llenado parcial del campo de captadores

Tabla 7 Mantenimiento en Sistema de Captación

Legionelosis

Esta enfermedad infecciosa está provocada por la legionella. La bacteria de la legionela prolifera en agua con cierto grado de suciedad a una temperatura óptima entre 35 °C y 46 °C, aunque pueden sobrevivir entre 20 °C y 60 °C. Bajo estas condiciones puede aparecer en los sistemas de ACS, llegando al ser humano. Cada país tiene una legislación o normativa para prevenirla.

3 DESCRIPCIÓN MÉTODO F-CHART

Existen varios programas de dimensionado de instalaciones solares. En España, el Pliego de Condiciones Técnicas Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) aconseja la utilización del método de cálculo f-Chart o método de las curvas f. También el IDEA, junto a Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT) han elaborado un programa informático *CHEQ4* con el fin de facilitar el cumplimiento, aplicación y evaluación de la sección HE4 incluida en la exigencia básica HE Ahorro de la energía del Código Técnico de la Edificación (CTE) para el sector de la energía térmica solar de baja temperatura.

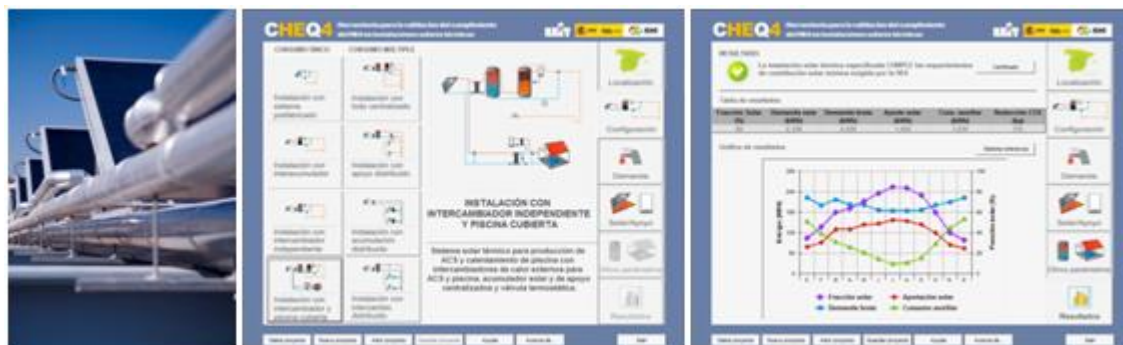


Imagen 35 CHEQ 4

El método f-Chart fue desarrollado por Sandfor Klein en 1976. La Universidad de Colorado comprobó la precisión del método comparándolo con un sistema solar térmico real, donde se observó un error de un 5%, por lo que fue clasificado como alto grado de fiabilidad (6).

El método f-Chart consiste en calcular el porcentaje de la demanda cubierta de la instalación con una superficie de captación y un volumen de acumulación en una ubicación y con un criterio de demanda establecido. Es aceptado como un cálculo exacto para estaciones de un amplio periodo de tiempo, no semanal o diario. Se utilizan datos mensuales medios meteorológicos. Es aplicable a sistemas de calefacción y producción de ACS, con la demanda de ACS inferior al 20 % de la demanda de calefacción.

Para realizar los cálculos se va a considerar un sistema base de energía solar sin intercambiador de calor en el circuito de captación y con una acumulación de 75 L/m² de superficie de captación. En cuanto al resto de parámetros de diseño el rango de variación de éstos será:

Orientación captadores solares	Sur $\pm 15^\circ$
Inclinación captadores solares	Latitud $\pm 15^\circ$
Caudal de circulación en captadores	0,01 a 0,02 l/s m ²
Efectividad intercambiador en circuito primario	$\geq 0,7$
Capacidad de almacenamiento (75 l/m²)	50 a 100 l/m ²

Tabla 8 Rango de variación de parámetros

Para el cálculo del rendimiento mensual del sistema se procede de la siguiente forma. Se define como la fracción mensual de demanda aportada por la energía solar (f):

$$f = \frac{Q_T}{L} \simeq \frac{F_R (\tau\alpha)_m \bar{H} N A}{L} - \frac{F_R U_L (T_{ref} - T_{am}) \Delta t A}{L} = \phi(X, Y)$$

Es definida la fracción mensual pues los datos aportados para su cálculo son mensuales, por lo que para el cálculo

del rendimiento anual: $f_{año} = \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_{Ti}}{\sum_{i=1}^{12} L_i}$ se calcula como la fracción de energía solar anual que cubre la demanda anual.

Para captadores de líquido la función queda:

$$f = 1,029 Y - 0,065 X - 0,245 Y^2 + 0,0018 X^2 + 0,0215 Y^3$$

Donde:

Y es el factor de ganancias.

X es el factor de pérdidas.

El rango de valores de cada término sería:

$$0 < Y < 3$$

$$0 < X < 18$$

$$0 < f < 1$$

Esa curva f , dependiente del factor de ganancias (Y) y de pérdidas (X), es representable gráficamente en la imagen siguiente, donde se observa que con un factor de pérdidas y ganancias se puede determinar f .

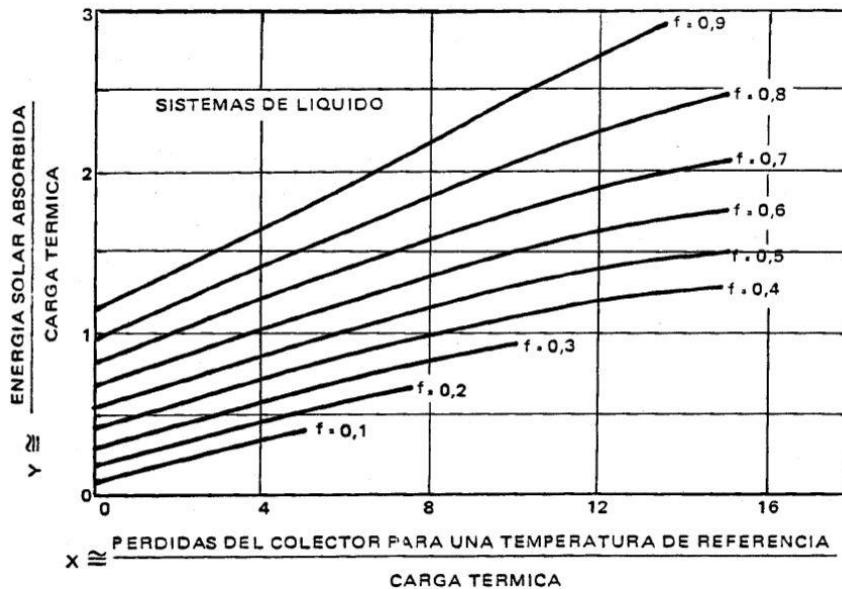


Imagen 36 Curva f

Los factores de ganancias y de pérdidas se definen como:

$$\text{Factor de ganancias: } Y = \frac{F_R (\tau\alpha)_m \bar{H} N A}{L}$$

$$\text{Factor de pérdidas: } X = \frac{F_R U_L (T_{ref} - T_{am}) \Delta t A}{L}$$

Donde los términos que intervienen son:

T_{ref} : Temperatura de referencia, son $100^\circ C$.

$F_R U_L$: Factor de pérdidas del captador solar ($W/m^2 K$).

A : Área de captador solar (m^2).

$F_R (\tau\alpha)_m$: Producto transmitancia-absortancia medio mensual. Siendo: $(\tau\alpha)_m \approx 0,96 (\tau\alpha)_n$, es multiplicado por el modificador del ángulo de incidencia, tomado como constante e igual a 0,96.

\bar{H} : Radiación incidente media mensual en base diaria ($J/m^2 \text{ día}$).

T_{am} : Temperatura ambiente media exterior ($^\circ C$). Depende de la localidad y del mes.

N : Número de días al mes (*días*).

L : Demanda ACS (*J/mes*).

Δt : Periodo de tiempo (*s/mes*).

3.1 Punto de partida

Para comenzar con el cálculo es necesario tomar unos datos iniciales como son:

- Localidad y datos de consumo mensual
- Inclinación y azimut del captador

A partir de la selección de estos datos se va a seguir la metodología impuesta en la asignatura *Energía Solar* del Grado de Ingeniería de las Tecnologías Industriales:

1) Elegir un captador solar: $F_R U_L, F_R (\tau\alpha)_n$

Se elige el tipo de captador y modelo, y por consiguiente las propiedades del captador, como son el factor de pérdidas y el factor transmitancia-absortancia.

2) Definir agrupación captadores y acumulación (V)

Se elige el volumen de acumulación que se va a instalar y la agrupación de captadores, es decir, el número de captadores en serie (N_S) o paralelo (N_P).

3) Corregir por caudal

Se recurrirá a la corrección de caudal cuando el caudal de ensayo y el real sean distintos, y el factor C_M que se debe de calcular se hará gráficamente, y dependerá del caudal de ensayo del captador solar (0,005 – 0,030 $kg/s\ m^2$) y de la relación de las capacidades caloríficas real y de ensayo ($MC_p / MC_{p\ ENSAYO}$).

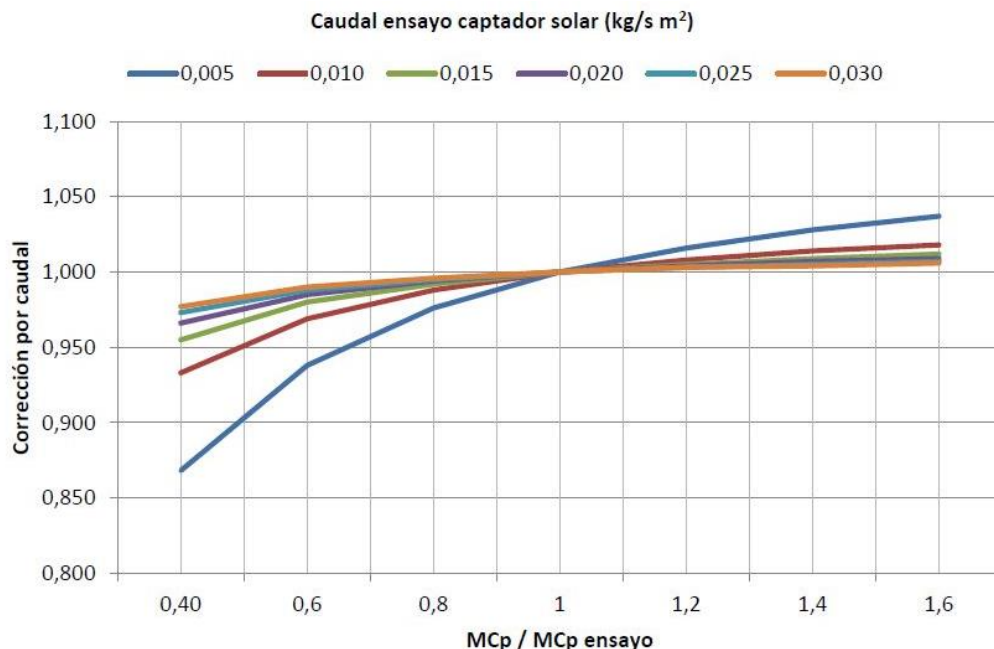


Imagen 37 Corrección gráfica por caudal

$$C_M = \frac{F_R}{F_{R, ENSAYO}}$$

$$F_R(\tau\alpha)_n = C_M F_R(\tau\alpha)_n ENSAYO$$

$$F_R U_L = C_M F_R U_L ENSAYO$$

Pudiendo ser C_M mayor o menor que uno.

4) Corregir por agrupación de captadores

Esta corrección afecta a aquella agrupación que disponga captadores en serie, pues la temperatura de salida de un captador será la de entrada del siguiente, mientras que en el caso de captadores en paralelo la temperatura de entrada y salida de cada uno es independiente, como se muestra en la siguiente imagen.

Se calcula el factor K , que se define de la siguiente forma:

$$K = \frac{AF_R U_L}{M C_p} = \frac{F_R U_L}{G C_p}$$

Siendo el caudal específico (G) constante en un captador solar plano.

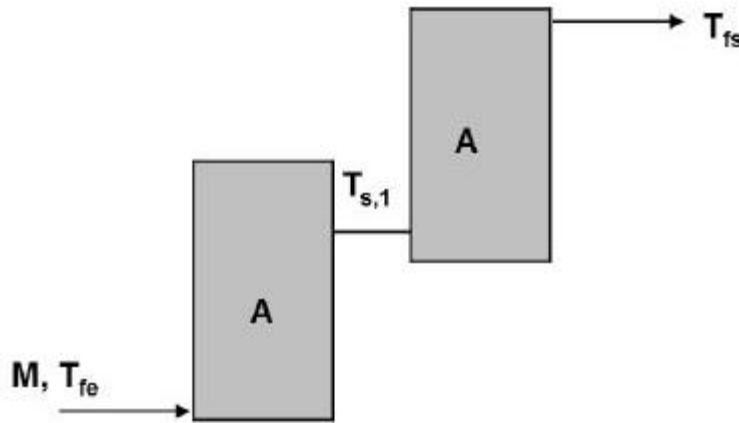


Imagen 38 Captadores en serie

Calculado el valor de K se puede calcular el factor corrector por agrupación (C_A):

$$C_A = 1 - \frac{K}{2}$$

Se generaliza para N_S captadores en serie, quedando de la siguiente forma:

$$C_A = \frac{1 - (1 - K)^{N_S}}{N_S K}$$

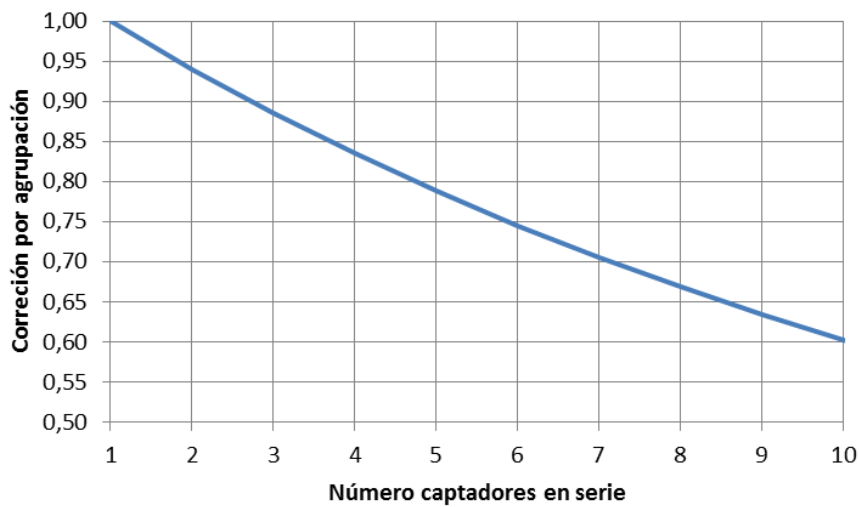


Imagen 39 Dependencia de C_A de N_S

Siendo siempre C_A de un valor menor a la unidad:

$$C_A < 1$$

5) Corregir por intercambiador de calor

Si al captador solar definido se le incorpora un intercambiador, se deben de corregir los factores de ganancia Y y de las pérdidas X. Se calcula el factor correctivo debido a añadir un intercambiador (C_{int}) mediante la ecuación:

$$C_{int} = \left[1 + \frac{A F_R U_L}{M C_{pp}} \left(\frac{M C_{pp}}{\varepsilon (M C_p)_{min}} - 1 \right) \right]^{-1}$$

Siendo:

ε : La eficiencia del intercambiador.

$M C_{pp}$: Capacidad calorífica del fluido del circuito primario (W/K).

$(M C_p)_{min}$: Capacidad calorífica mínima de los fluidos en el intercambiador (W/K).

Para cada mes:

6) Calcular la demanda mensual (L)

En primer lugar, se debe de conocer el consumo de litros al día por persona de agua caliente que tiene lugar en función del criterio de la demandada:

Consumo de agua caliente (M_{ac})

Estimación del consumo medio diario se tomarán los valores en Norma UNE 94002:2005 asociados a una temperatura de referencia del agua de red.

Criterio de demanda	Litros/día·unidad	Unidad
Vivienda	28	Por persona
Hospitales y clínicas	55	Por persona
Ambulatorio y centro de salud	41	Por persona
Hotel *****	69	Por persona
Hotel ****	55	Por persona
Hotel ***	41	Por persona
Hotel/Hostal **	34	Por persona
Camping	21	Por persona
Hostal/pensión *	28	Por persona
Residencia	41	Por persona
Centro penitenciario	28	Por persona
Albergue	24	Por persona
Vestuarios/Duchas colectivas	21	Por persona
Escuela sin ducha	4	Por persona
Escuela con ducha	21	Por persona
Cuarteles	28	Por persona
Fábricas y talleres	21	Por persona
Oficinas	2	Por persona
Gimnasios	21	Por persona
Restaurantes	8	Por persona
Cafeterías	1	Por persona

Tabla 9 Demanda de referencia a 60 °C (3)

Para el cálculo de la demanda de ACS se parte de un consumo estimado de agua caliente diaria para higiene personal y otros usos:

$$L_{ACS} = M_{ac} \rho C_p (T_{ac} - T_{af}) N$$

Siendo:

M_{ac} : Consumo de agua caliente (l/día).

ρ : Densidad del agua (1 kg/l).

C_p : Calor específico del agua (4190 J/kg °C).

N : Número de días del mes.

7) Calcular la radiación solar sobre la superficie de captación: H (J/m²día)

Radiación solar

Es necesario conocer la radiación solar disponible sobre superficie plana en una base de tiempo adecuada. Por lo tanto, es necesario seleccionar una ubicación, una orientación e inclinación. Hay que calcular una serie de parámetros y variables. Dada la ubicación queda definida la latitud y la longitud.

El cálculo de la declinación se realiza con la ecuación de Cooper:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

Siendo n el día del año representativo del mes, por lo que se obtiene el siguiente resultado en cuanto a inclinación, además se exponen los días representativos de cada mes:

MES	DÍA DEL MES	DÍA DEL AÑO	DECLINACIÓN (°)
ENERO	17	14	-20,9
FEBRERO	16	47	-13,0
MARZO	16	75	-2,4
ABRIL	15	105	9,4
MAYO	15	135	18,8
JUNIO	11	162	23,1
JULIO	17	198	21,2
AGOSTO	16	228	13,5
SEPTIEMBRE	15	258	2,2
OCTUBRE	15	288	-9,6
NOVIEMBRE	14	318	-18,9
DICIEMBRE	10	344	-23,0

Tabla 10 Día del año y declinación característica del mes

La declinación será mayor en los solsticios de verano e invierno (junio y diciembre) y nula en los equinoccios de otoño y primavera (marzo y septiembre) (Imagen 40).

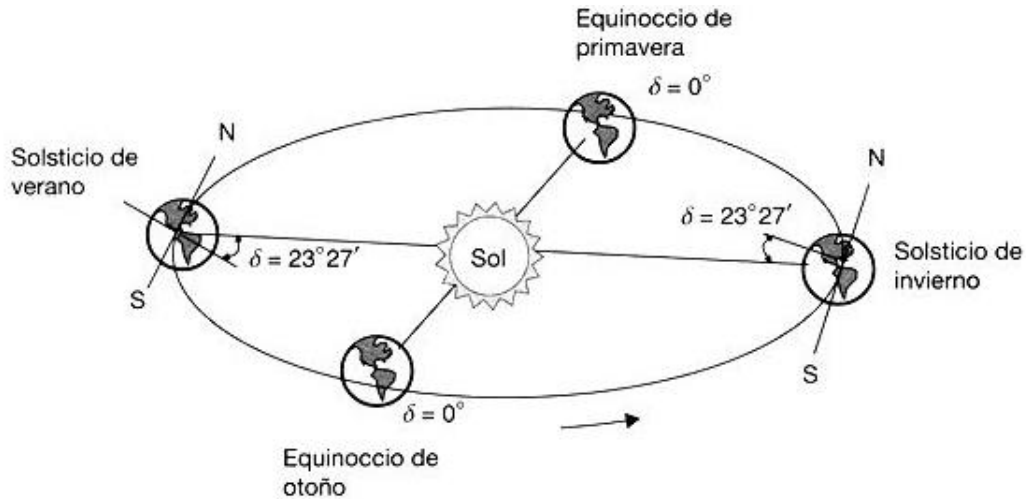


Imagen 40 Órbita terrestre

Para el cálculo del ángulo horario en superficie horizontal (ω_s) se necesita los datos de la declinación y la latitud, ambos conocidos:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \delta \tan \phi)$$

Donde ϕ es la latitud, y es dato del problema.

La radiación solar se descompondrá en directa y difusa. La radiación solar recibida sin modificar su dirección al atravesar la atmósfera terrestre se denomina radiación solar directa, mientras que la radiación solar difusa es el resultado de modificar la dirección de la radiación al atravesar la atmósfera como consecuencia de la dispersión atmosférica. Conociendo la relación de éstas:

$$\bar{H} = \bar{H}_D + \bar{H}_d$$

Siendo:

\bar{H} : La radiación solar media mensual en una superficie horizontal ($MJ/m^2 día$).

\bar{H}_D : La radiación solar directa media mensual en una superficie horizontal ($MJ/m^2 día$).

\bar{H}_d : La radiación solar directa media difusa en una superficie horizontal ($MJ/m^2 día$).

Partiendo de la radiación solar global en superficie horizontal en base diaria u horaria, y con el fin de calcular la radiación solar horaria incidente sobre superficie inclinada se seguirán los siguientes pasos:

- I) Descomponer la radiación solar global diaria media mensual horizontal en sus componentes directa y difusa:

En primer lugar, se debe calcular el índice de claridad media mensual, definido como la relación entre la radiación global horizontal y la radiación solar extraterrestre en superficie horizontal:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$$

Donde la radiación extraterrestre horizontal (\bar{H}_0), se calcula de la siguiente forma con lo conocido anteriormente y el dato de la constante solar (G_{CS}):

$$\bar{H}_0 = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} G_{CS} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right) \left(\frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s \right)$$

Siendo la constante solar:

$$G_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2$$

La relación entre la radiación global y la difusa dependerá de la estación del año en la que se encuentre:

Para $\omega_s \leq 81,4^\circ$ (invierno) y $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560 \bar{K}_T + 4,189 \bar{K}_T^2 - 2,137 \bar{K}_T^3$$

Para $\omega_s > 81,4^\circ$ (primavera, verano, otoño) y $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022 \bar{K}_T + 3,427 \bar{K}_T^2 - 1,821 \bar{K}_T^3$$

II) Calcular la radiación global diaria media mensual sobre superficie inclinada:

$$\bar{H}_T = \bar{R}_D \bar{H}_D + \frac{1 + \cos\beta}{2} \bar{H}_d + \frac{1 - \cos\beta}{2} \rho_{suelo} \bar{H}$$

Siendo:

- β el ángulo de inclinación del captador.
- ρ_{suelo} reflectividad del suelo.

Se observan los términos de radiación directa, radiación difusa y la debida a la reflectividad del suelo, pues cuando la radiación directa impacta en el suelo parte de ella es reflejada.

Se puede definir un factor de conversión:

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \bar{R}_D \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} + \frac{1 + \cos\beta}{2} \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} + \frac{1 - \cos\beta}{2} \rho_{suelo}$$

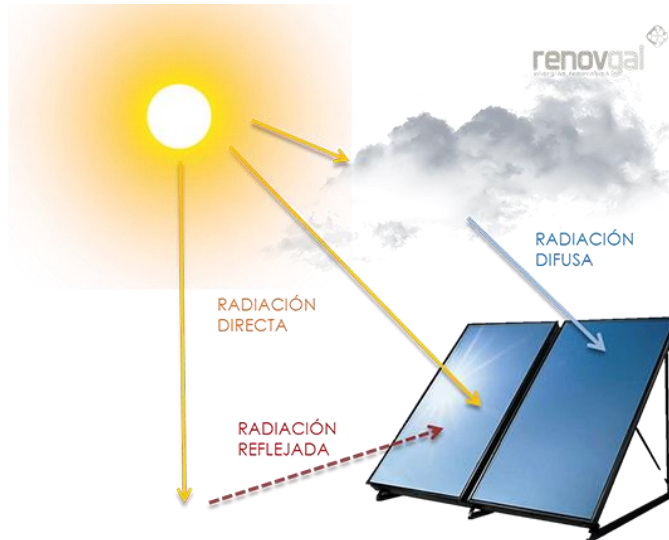


Imagen 41 Radiación directa, reflejada y difusa

Para superficies orientadas al sur $\mp 15^\circ$ el cálculo del factor referente a la radiación directa:

$$\bar{R}_D = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega_s' + \frac{\pi \omega_s'}{180} \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta}$$

$$\omega_s' = \min \begin{cases} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta) \end{cases}$$

III) Calcular la radiación global sobre superficie inclinada:

Con lo anterior descrito y sabiendo que la componente directa y difusa tienen la siguiente relación:

$$\bar{H}_D = \bar{H} - \bar{H}_d$$

Con esto se calcula la radiación global diaria media mensual sobre superficie inclinada.

8) Calcular los parámetros X/A e Y/A

Se calcula con las ecuaciones detalladas anteriormente y con los datos calculados hasta ahora.

9) Corregir X/A por demanda ACS si $L_{ACS} > 0,20 L_{CALEF}$:

El método ha sido desarrollado para instalaciones cuya demanda de ACS es inferior al 20% de la demanda de calefacción. Si dicho porcentaje es superior, se corrige el factor de pérdidas adimensional X por la ecuación:

$$\frac{X_c}{X} = \frac{11,6 + 1,18 T_{ac} + 3,86 T_{af} - 2,32 T_{am}}{100 - T_{am}}$$

Siendo:

T_{ac} : Temperatura de preparación del agua caliente ($^{\circ}C$).

T_{af} : Temperatura del agua fría ($^{\circ}C$). Depende de la localidad y del mes.

Temperatura de agua fría (T_{af}):

Corresponde a la temperatura de suministro o temperatura del agua de red. Se toman los valores medios mensuales en Norma UNE 94002:2005 (Anexo A).

10) Corregir X/A por acumulación si $V \neq 75 L/m^2$:

Este método está desarrollado para un volumen de acumulación de $75 L/m^2$, por lo que si es diferente dicho volumen se debe corregir el factor de pérdidas adimensional X de la siguiente forma:

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{V}{75} \right)^{-0,25}$$

Siendo V en unidades de l/m^2 de superficie de captación, y estando en el intervalo: $37,5 < V < 300$,

11) Elegir una superficie de captación: A

Esta área, al igual que el volumen de acumulación es una hipótesis establecida que posteriormente, en el último paso del método, habrá que comprobar si cumple las imposiciones del código técnico.

12) Calcular X e Y

Se obtiene de las relaciones X/A e Y/A ya que se conoce el valor del área A.

13) Calcular f en función de X e Y

Calcular con la fórmula detallada anteriormente.

14) Calcular f en base anual

La fracción de demanda cubierta anualmente se calcula como el total aportado durante el año dividido por la demanda anual total.

$$f_{anual} = \frac{Q_{anual}}{L_{anual}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_i}{\sum_{i=1}^{12} L_i} = \frac{\sum_{i=1}^{12} f_i L_i}{\sum_{i=1}^{12} L_i}$$

Una vez calculada la fracción anual se comprueba que cumple la fracción mínima que se debe de cubrir según

el código técnico - *HE4*.

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 11 Contribución solar mínima (%) para ACS

Si se cubre una demanda mayor a la establecida en el código técnico hay que revisar si alcanza el 100%, pues no se debe superar más de tres meses al año el 100%, y ningún mes el 110%. Se producirían de esta forma los denominados sobrecalentamientos.

Según el documento *HE 4* si en un mes del año la contribución solar sobrepasa el 100 % de la demanda energética se adoptarán cualquiera de las siguientes medidas:

- Disipación de excedentes.
- Tapado parcial campo de captadores, con circulación del fluido.
- Vaciado parcial campo de captadores.
- Desvío de excedentes a otras aplicaciones existentes.

No se tomarán en consideración aquellos periodos en los que la demanda se sitúe un 50 % por debajo de la media correspondiente al resto del año, tomándose las medidas de protección adecuadas.

Si no cumple la fracción anual mínima exigida por el reglamento o la instalación está sobredimensionada y puede provocar sobrecalentamientos se debe volver a realizar el método suponiendo un volumen de acumulación (V) y una agrupación de captadores diferente (N_S, N_P). Se vuelve, de esta forma, a repetir todos los pasos anteriores de método y se realizará una nueva comprobación, ya que es un proceso iterativo.

4 CASO PRÁCTICO

El método f-Chart propone una secuencia de pasos, que parte de una suposición de volumen de acumulación y campo de captadores. Posteriormente se calcula la fracción de demanda que cubre esa situación, y si no cumple con lo impuesto en el reglamento se deberá comenzar de nuevo, con nuevas hipótesis que finalizarán de nuevo en el cálculo de la fracción de la demanda cubierta.

En el método que se propone está basado en las ecuaciones del f-Chart, pero a diferencia de éste no hay que realizar iteraciones.

Para realizar este método se ha recurrido al software *Engineering Equation Solver* (EES). Se trata de un programa que puede resolver un gran número de ecuaciones, por lo que es una herramienta fundamental para realizar los múltiples cálculos que se explicarán seguidamente.

El objetivo de este trabajo de fin de máster es la obtención de unas ecuaciones basada en la optimización económica de unas instalaciones, es decir, se pretende optimizar una serie de instalaciones situadas en una localidad, eligiendo un área y volumen que hagan que cumpla las exigencias del reglamento. Con este software se crearán tablas donde se reflejen numéricamente estos resultados y, a partir de éstas, se seleccionará la opción que ofrece este mismo software denominada *Linear Regression*, con la que se obtendría la ecuación seguiría la tendencia de estos resultados. Es el denominado ajuste o regresión lineal usado en estadística usado para aproximar la relación de dependencia entre una variable dependiente Y y otras independientes X_i :

$$Y = Y(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_i)$$

En este software se puede fijar esta dependencia en una ecuación polinómica de distinto grado a elegir, inclusive se pueden seleccionar términos cruzados:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_1^2 + a_3 \cdot X_2 + a_4 \cdot X_2^2 + a_5 \cdot X_1 \cdot X_2 + \dots$$

Con esto se pretende ajustar lo máximo posible una recta a unos datos dispersos de la siguiente forma:

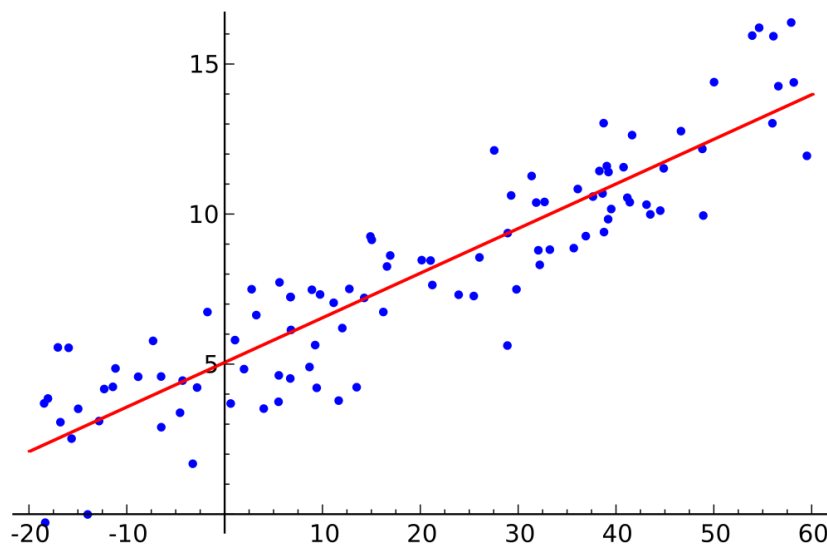


Imagen 42 Recta ajustada a dispersión de datos

Al obtener la ecuación que obedece la tendencia de dichos datos se le pedirá de la misma forma al software el valor de R^2 , denominado como el coeficiente de determinación. Este coeficiente informa de la calidad del modelo para replicar los resultados. En este contexto estadístico del ajuste lineal este coeficiente corresponde con el coeficiente de correlación de Pearson. Cuanto mayor sea el valor mejor ajuste se ha realizado, siendo el máximo valor el 100%.

Los datos a ajustar, como se ha comentado, serán los resultantes de la optimización económica con cumplimiento del reglamento, por tanto, se pretende obtener ecuaciones de área de captadores, volumen, ... que dependan de

una serie de variables, que corresponde con las variables independientes.

Se va a dar una descripción del código y de la función objetivo en primer lugar, y posteriormente se seguirá con una serie de ejemplos y una demostración de las ecuaciones que se persiguen, con sus respectivas representaciones y su coeficiente R^2 .

4.1. Código

En primer lugar, se han introducido todas las ecuaciones recogidas en el método f-Chart. Para llevar a cabo dicho método es necesario la selección de:

- Localidad y datos de consumo mensual.
- Inclinación y azimut del captador.

Al igual que en el método f-Chart, se seleccionará una características del captador, pero a diferencia de éste no se detallará el área total de la instalación ni el volumen de acumulación.

Éste área y volumen serán obtenidos de la optimización de una función objetivo. Se propone, una vez escritas todas las ecuaciones referentes al método f-Chart, añadir una última ecuación, la denominada función objetivo, que tendrá la siguiente forma:

$$FO[\text{€}] = Coste_{\text{área}} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] \cdot \text{Área} + Coste_{\text{volumen}} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{Volumen}$$

Lo que se pretende es seleccionar el área y el volumen de acumulación que hagan que esta función tenga el mínimo valor posible, y con ello, el menor coste económico. Para ello se tiene que cumplir el reglamento, que define la fracción mínima anual que debe de cubrir la instalación:

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 12 Contribución solar mínima (%) para ACS

Esta fracción anual quedará definida con la selección de la localidad, pues quedaría definida la zona climática, y la demanda en las unidades de volumen de litros al día. Esta demanda será calculada de la misma forma que la expuesta en el apartado del método f-Chart, por lo tanto, habrá que consultar la tabla en la que quedan definidos los consumos diarios por personas en función del uso del edificio donde se instalará.

Para optimizar esta función objetivo se puede recurrir al *EES*, pues posee la opción de encontrar el máximo y el mínimo en función de una variable libre. Para ello se va a recurrir a la variable que relaciona el área de captación total con el volumen de acumulación (V/A), y que según el *Documento Básico de Ahorro de Energía* deberá estar definido entre:

$$50 < \frac{V}{A} < 180$$

Donde:

- $A[\text{m}^2]$ es la suma total de área de captadores.
- $V[\text{l}]$ es el volumen de acumulación.

Se introducirán estos límites en *EES* y se seleccionará minimizar el valor de la función objetivo:

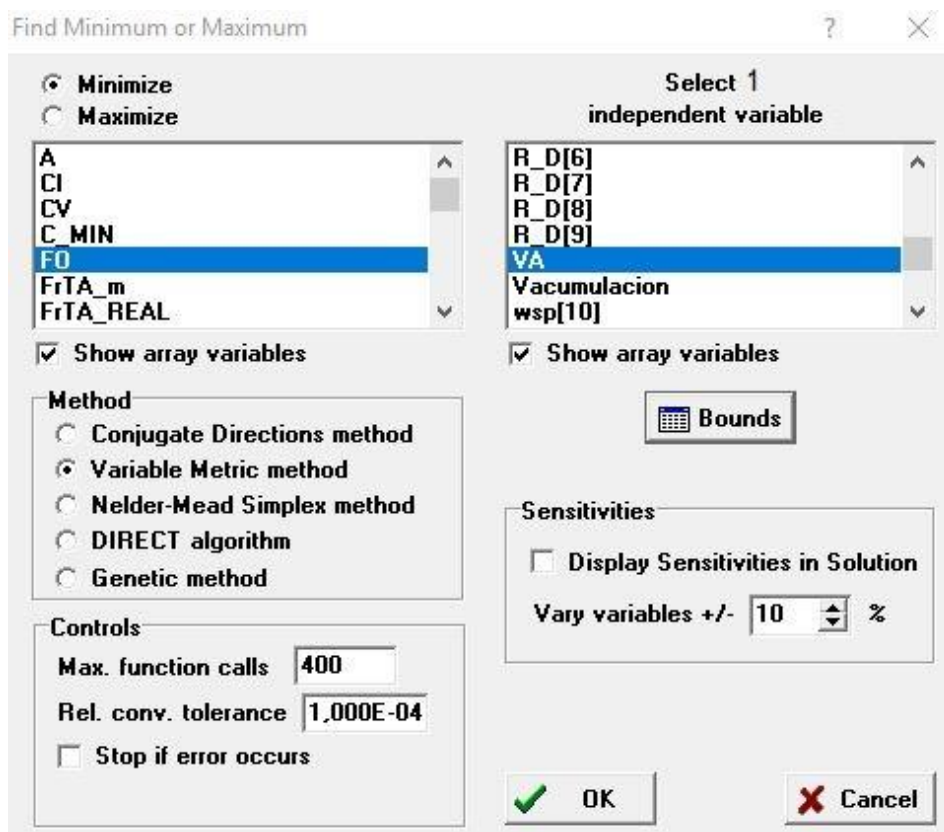


Imagen 43 Función minimizar, EES

Además, se indican los límites donde se debe encontrar el valor óptimo. Este software se basa en la iteración de valores, es decir, para encontrar el valor óptimo de la función objetivo irá probando con valores de V/A comprendidos en el límite impuesto hasta que encuentre en más favorable, por lo que para ayudarle de alguna forma se le da un valor inicial a partir del cual empezar a iterar, el denominado *Guess Value*.

Variable Information

☒ Show array variables ☐ Show string variables

MAIN program

Variable	Guess	Lower	Upper	Display	Units
VA	75	5,0000E+01	1,8000E+02	A 3 N	L/M2

Imagen 44 Límites de V/A

4.2. Función objetivo

Como se ha mencionado anteriormente, la función objetivo tiene la siguiente estructura:

$$FO[\text{€}] = Coste_{\text{área}} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] \cdot \text{Área} [\text{m}^2] + Coste_{\text{volumen}} \left[\frac{\text{€}}{\text{L}} \right] \cdot \text{Volumen} [\text{L}]$$

Los índices de costes referentes al área y al volumen deben de calcularse en base a catálogos. Para ello en primer lugar, hay que tipo de captador se va a escoger y qué tipo de acumulador es más factible.

El captador seleccionado es de la marca *Termicol* y posee las siguientes características:

- Absorbedor de parrilla.
- Marco de aluminio.

- Cubierta de vidrio templado de 3,2 mm.
- Aislamiento de lana de vidrio 15 mm de alta densidad.

$$F_R(\tau\alpha)_n = 0,715$$

$$F_R U_L = 6,7 \frac{W}{m^2 K}$$



Imagen 45 Captador elegido

Haciendo la media de los precios que se presentan en función del área se obtiene un índice:

$$Coste_{\text{área}} = 450 \frac{\text{€}}{m^2}$$

De la misma forma se procederá para la selección del depósito. En primer lugar, se va a considerar que se trata de grandes instalaciones, puesto que se consideraran hoteles, viviendas plurifamiliares, ... Por lo que el volumen de acumulación será elevado, por ello se ha escogido un acumulador de inercia. Para calcular el índice referente al volumen se va a consultar los catálogos de un fabricante de éstos.

Se ha escogido un depósito de inercia que contempla una amplia gama de volúmenes del fabricante *Salvador Escoda*. Este depósito es de acero y está aislado térmicamente con espuma rígida de poliuretano inyectado en molde libre.

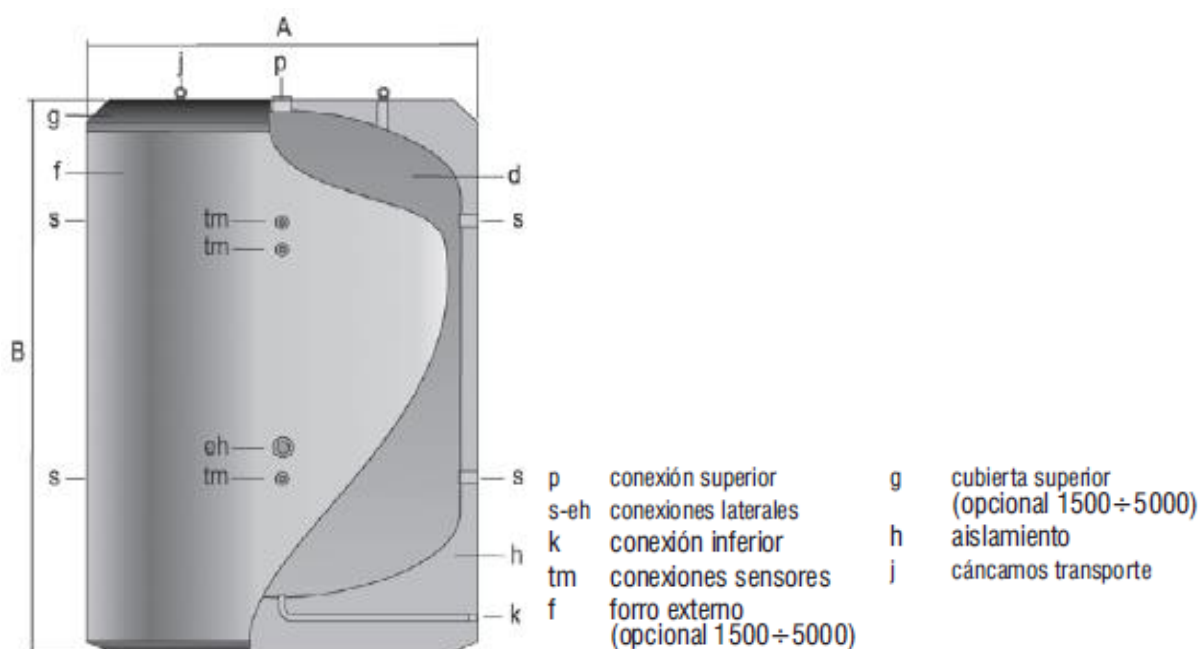


Imagen 46 Depósito de inercia

Se procede de la misma forma que para calcular el índice relacionado con el área, y se obtiene:

$$Coste_{volumen} = 1,2 \frac{\text{€}}{L}$$

Por lo que la función objetivo queda de la siguiente forma:

$$FO[\text{€}] = 450 \left[\frac{\text{€}}{m^2} \right] \cdot \text{Área} [m^2] + 1,2 \left[\frac{\text{€}}{L} \right] \cdot \text{Volumen} [L]$$

4.3. Ejemplos

Se ha elegido como localización Sevilla, en cada caso se elegirá un número de ocupantes para el edificio donde se realizará la instalación y la función a la que se destina el edificio. Para todos los casos se ha decidido una inclinación de 45° de los captadores, comprobando que cumple las pérdidas máximas impuestas por el Código técnico relativo al cumplimiento del límite de pérdidas por orientación, inclinación y sombras.

Se asume que las instalaciones tienen una disposición de los captadores de tipo general, por lo que no debe exceder el 10% de pérdidas por orientación e inclinación, un 10% de pérdidas por sombras, y un 15% de pérdidas totales, como se muestra en la siguiente tabla:

Caso	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	10 %	10 %	15 %
Superposición de captadores	20 %	15 %	30 %
Integración	40 %	20 %	50 %

Tabla 13 Pérdidas máximas

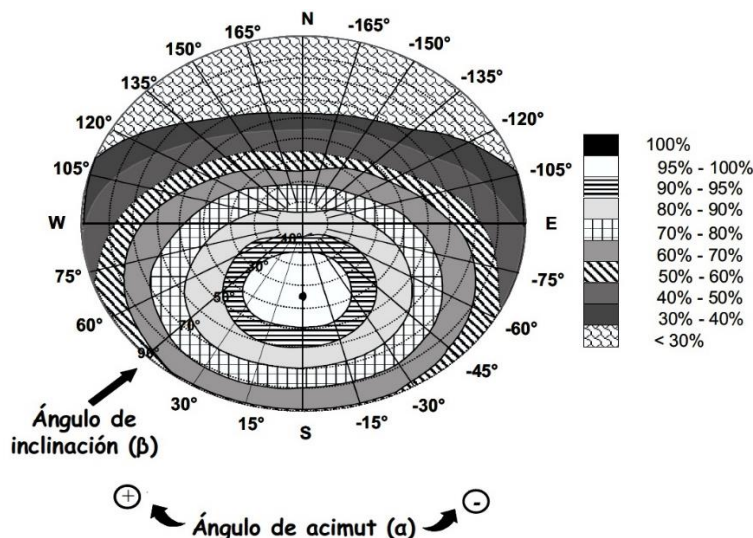


Imagen 47 Pérdidas por orientación e inclinación en función de inclinación y de acimut

En esta instalación el campo solar se propone con una orientación al Sur y una inclinación de 45° con respecto a la horizontal, lo que lo sitúa en unas pérdidas por orientación e inclinación de 5%, al ser de tipo general cumpliría con las especificaciones del CTE.

No se producen sombras por captadores contiguos, ni por edificios próximos, por lo que se espera unas pérdidas nulas.

Sevilla se encuentra en una latitud de $37,38^\circ$, tal y como indica el CTE se debe corregir. Las pérdidas asociadas a la inclinación se obtendrán según el CTE HE4 en función del ángulo de acimut (α), el ángulo de inclinación utilizado (β) y el ángulo de inclinación óptimo ($\beta_{\text{óptimo}}$) quedan reflejadas en la imagen anterior, sin embargo, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P\acute{e}rdidas (\%) = 100 \cdot \left[1,2 \cdot 10^{-4} (\beta - \beta_{\acute{o}ptimo})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2 \right] = 0,768 \%$$

Siendo cada término:

$$\alpha = 0^\circ$$

$$\beta_{\acute{o}ptimo} = 37,38^\circ$$

$$\beta = 45^\circ$$

Por lo que se cumplen las pérdidas máximas impuestas en el caso de disposición general.

Hotel 5*

Para mostrar cómo funciona en un caso se va a mostrar el siguiente ejemplo, y comprobar así la variación que sufre la función objetivo. En primer lugar, se va a seleccionar una localidad, de esta forma quedan definidas la temperatura ambiente, temperatura de red, radiación, latitud y longitud. Con la definición de la ubicación también queda definida la zona.

Es necesario seleccionar la actividad del edificio y la ocupación. Con esto quedara fijada la demanda diaria, y, por consiguiente, la fracción anual mínima a cubrir.

En este ejemplo se ha seleccionado Sevilla, y el edificio en particular es un Hotel de 5 estrellas, con una demanda similar a lo largo de todo el año. En un hotel 5 estrellas se establece un consumo de 69 L/(personadıa). Tendrá una ocupación de 100 personas. Con esto queda definida la demanda diaria:

$$Demanda\ diaria = 100\ personas \cdot 69 \frac{L}{persona \cdot día} = 6\ 900\ L/dıa$$

En primer lugar, hay que comprobar en el reglamento que fracción mínima debe cubrir de demanda, para ello se necesita saber la zona que ocupa:

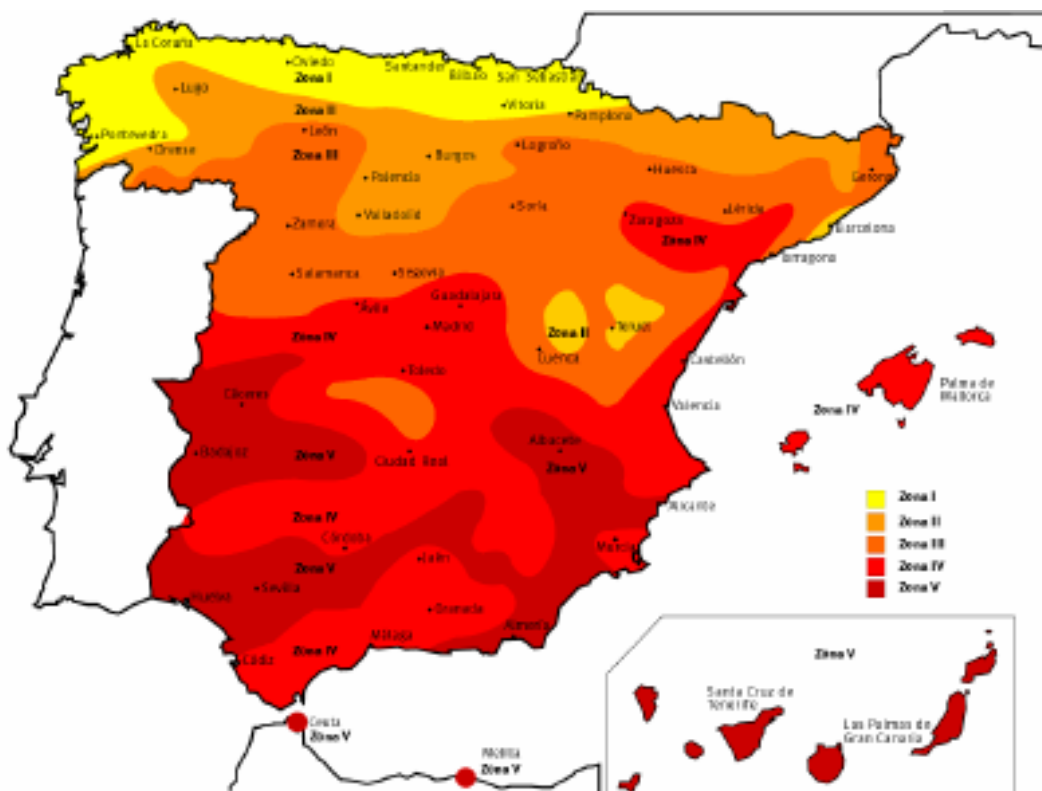


Imagen 48 Zonas en función de la radiación

Sevilla ocupa la zona V y tiene una demanda diaria el edificio de 6 900 L/día, de esta forma queda definida la fracción mínima anual de cobertura de demanda (f_{anual}):

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 14 Contribución solar mínima (%) para ACS

Con esto se deduce que $f_{anual} = 0,7$.

Los resultados y datos climatológicos introducidos para Sevilla se encuentran en el Anexo B.

Seleccionando la opción min/max de EES, minimizando FO en función de V/A se obtiene:

$$V/A = 58,89$$

$$FO = 45\,974 \text{ €}$$

$$V = 5\,200 \text{ L}$$

$$A = 88,3 \text{ m}^2$$

Se va a representar gráficamente la evolución de FO en función de V/A :

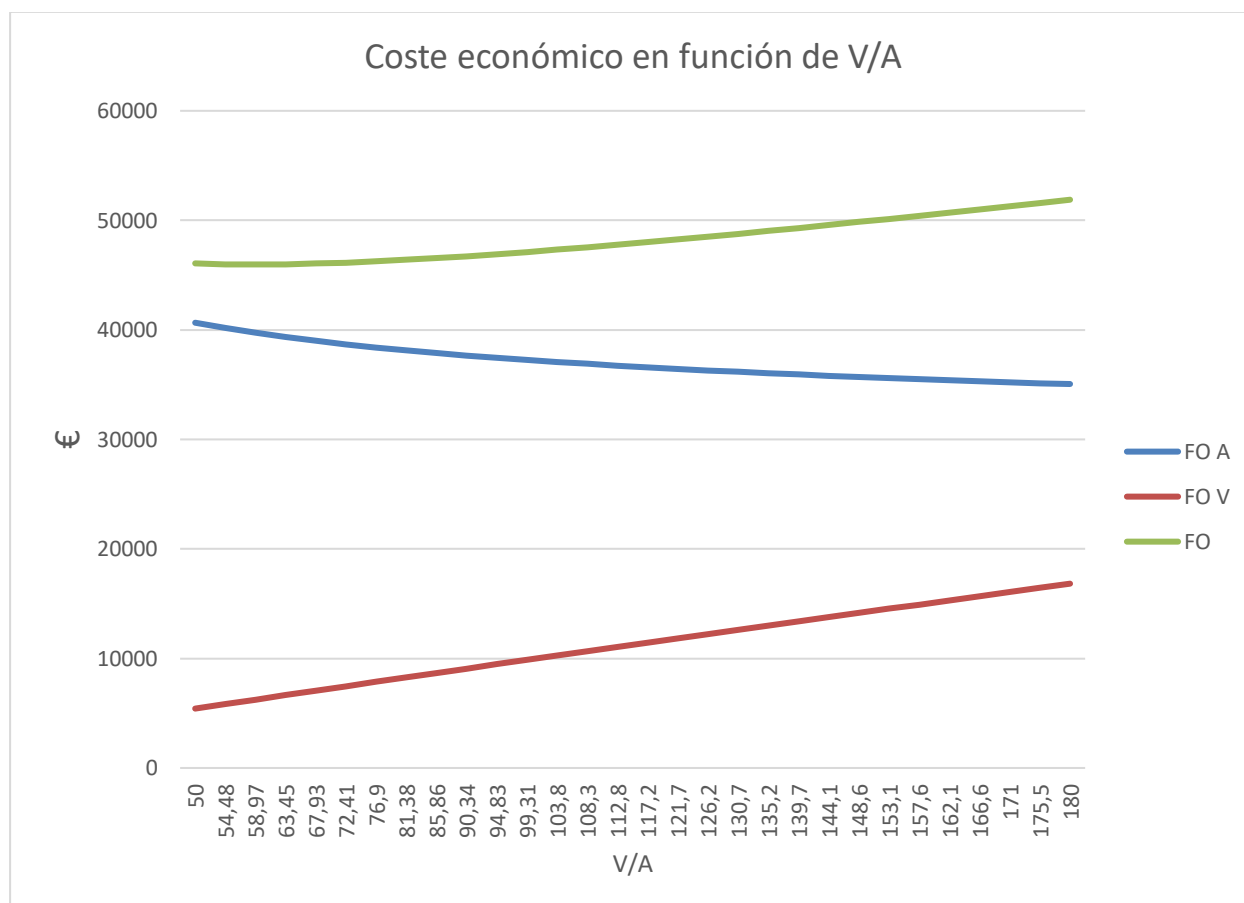


Imagen 49 Representación de FO frente V/A

Siendo:

- FO A: el coste económico de la superficie de captación.
- FO V: el coste económico del volumen de acumulación.
- FO: el coste económico total, siendo la suma de los dos anteriores.

Como ha indicado los resultados de la función min/max el mínimo de la función FO se sitúa entorno a $V/A=60$.

Se ha representado V/A entre los límites de 50 y 180 puesto que es lo establecido en el reglamento. Se va a representar a continuación en un intervalo más cercano al óptimo para que sea más apreciable.

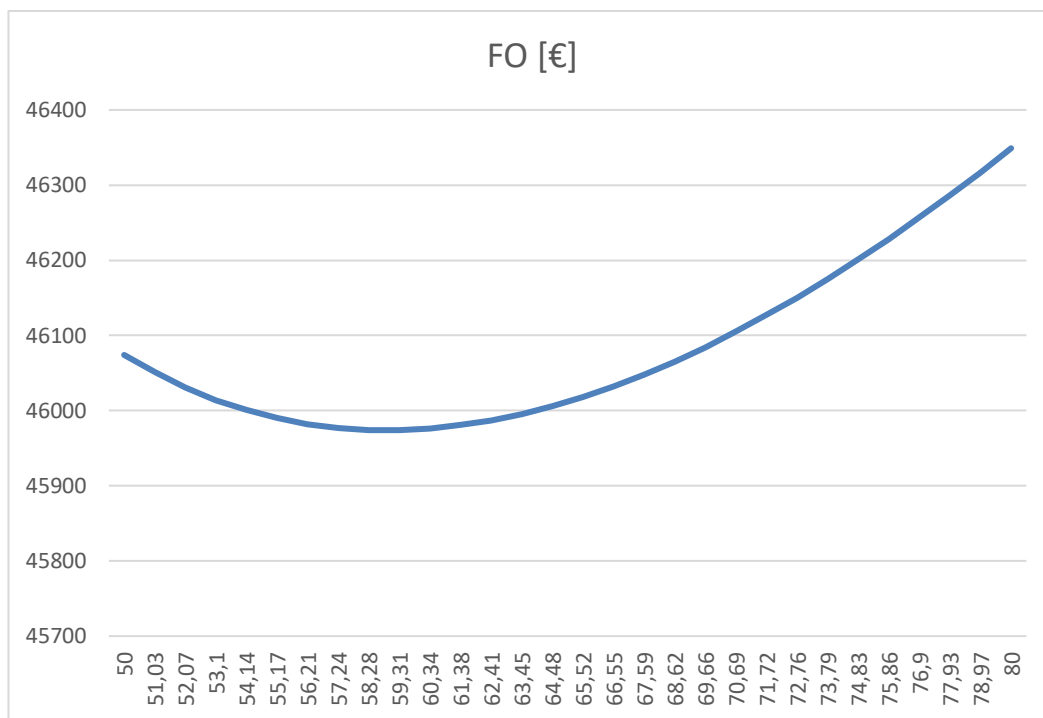


Imagen 50 Representación de FO frente V/A

Se van a analizar algunos de los datos y resultados obtenidos, como son la demanda, fracciones y factores de ganancias y pérdidas.

Estableciendo una fracción de demanda anual mínima cubierta del 70 % se obtienen los resultados que proceden.

La fracción de demanda mensual tiene la siguiente distribución, en los meses de julio y agosto presenta el punto más alto de demanda cubierta, y en los meses de diciembre y enero el menor porcentaje, tal y como se esperaba:

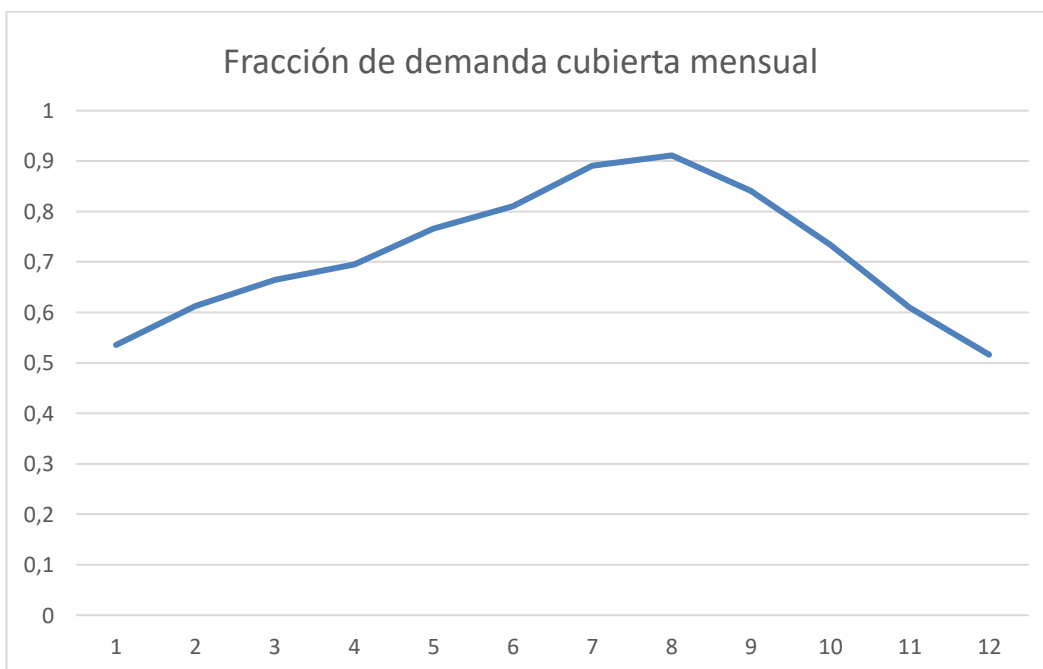


Imagen 51 Evolución de la fracción de demanda mensual cubierta

La evolución de la demanda presenta una bajada en los meses de verano, pues la temperatura del agua de la red es mayor, mientras que crece la demanda en los meses de invierno. Puesto que en verano la instalación capta mayor radiación, será mayor la demanda que cubre y sumado a que es cuando menor demanda existe, casi el total de la demanda es cubierta durante los meses de verano con los captadores solares, tal y como muestra la

siguiente imagen. En los meses de invierno la radiación es menor y la demanda mayor, por lo que será mayor la demanda no cubierta. El hecho de que exista demanda no cubierta implica que es necesario un sistema auxiliar de apoyo que aporte la energía que falta para cubrir la demanda, como puede ser una caldera de condensación de combustión de gas expuesta en apartados anteriores.

Hay que señalar que en este caso se ha impuesto una fracción de demanda cubierta anual de 70%, que es la mínima exigida por el reglamento. Si se hubiera impuesto una fracción mayor la instalación habría sido mayor y más costosa, y en los meses de verano, sobretudo julio y agosto, habría riesgo de sufrir una cobertura de demanda mayor del 100%, y, por lo tanto, sobrecalentamiento.

Hay que recordar que el reglamento impone que para evitar estos sobrecalentamientos ningún mes podrá superar el 110% de demanda cubierta, ni más de 3 meses alcanzar el 100%. En este caso no se alcanza en ningún mes una fracción de cobertura que se aproxime al 100%.

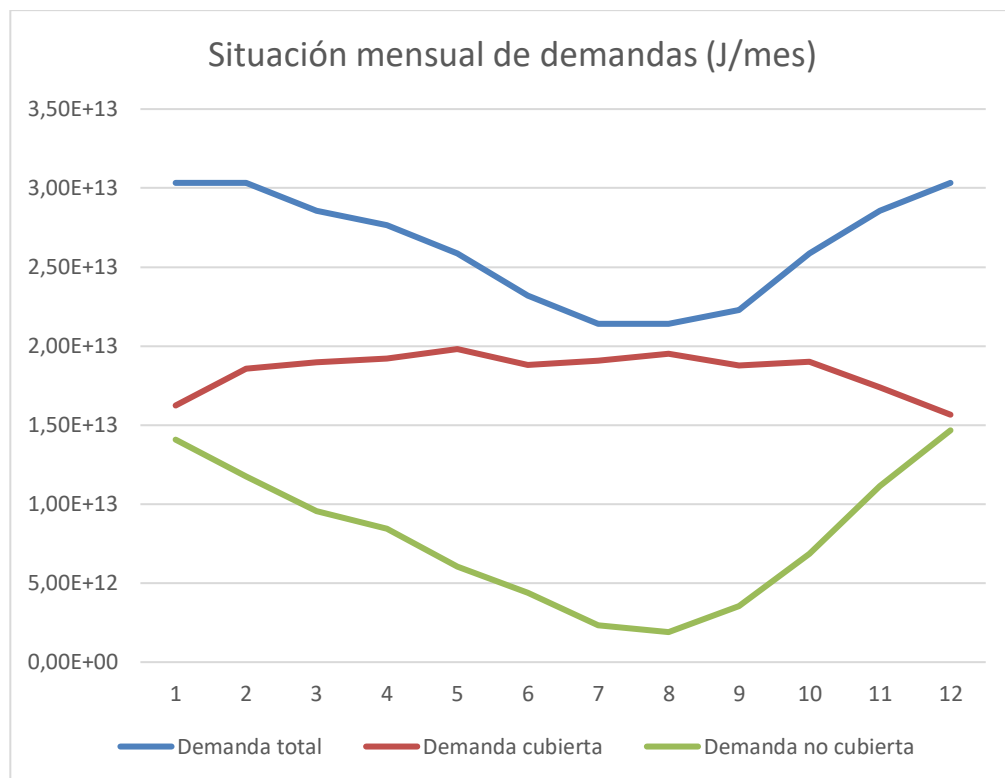


Imagen 52 Evolución mensual de demanda

La demanda sube en invierno debido a que la temperatura del agua de la red es menor, aunque los litros diarios empleados por persona se mantienen constantes. En los meses de invierno de enero y diciembre será necesario el uso de sistemas auxiliares para cubrir la mitad de la demanda.

La fracción de demanda cubierta depende del factor de pérdidas (X) y de ganancias (Y), pues como se ha mencionado en la memoria queda definido por:

$$f = 1,029 Y - 0,065 X - 0,245 Y^2 + 0,0018 X^2 + 0,0215 Y^3$$

El rango de valores de cada término es:

$$0 < Y < 3$$

$$0 < X < 18$$

Por lo que se va a calcular cada término para esta situación con la ecuación de su definición y se va a representar gráficamente cada mes en las siguientes imágenes:

$$Y = \frac{F_R (\tau\alpha)_m \bar{H} N A}{L}$$

$$X = \frac{F_R U_L (T_{ref} - T_{am}) \Delta t A}{L}$$

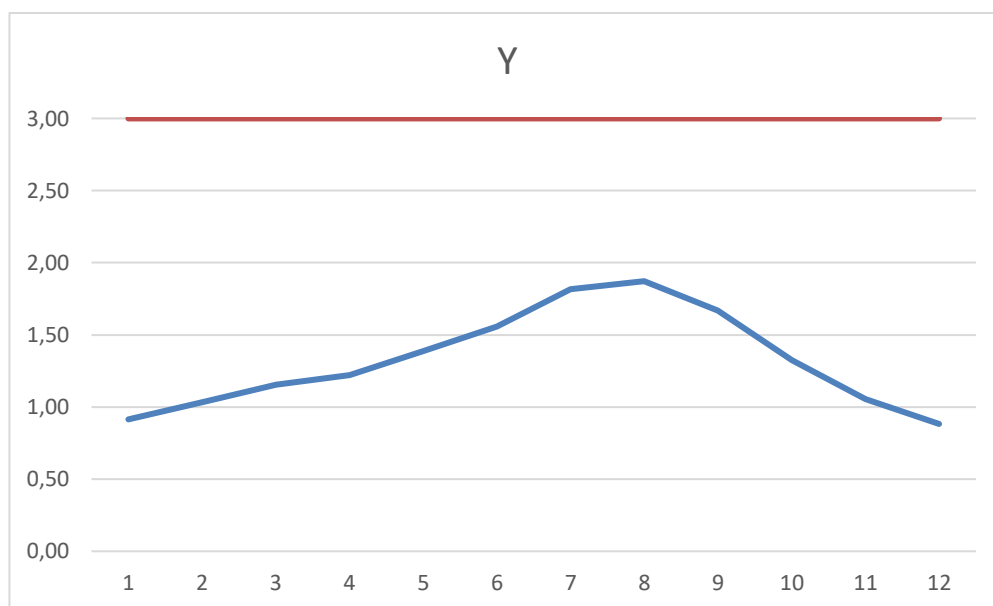


Imagen 53 Evolución del factor de ganancias

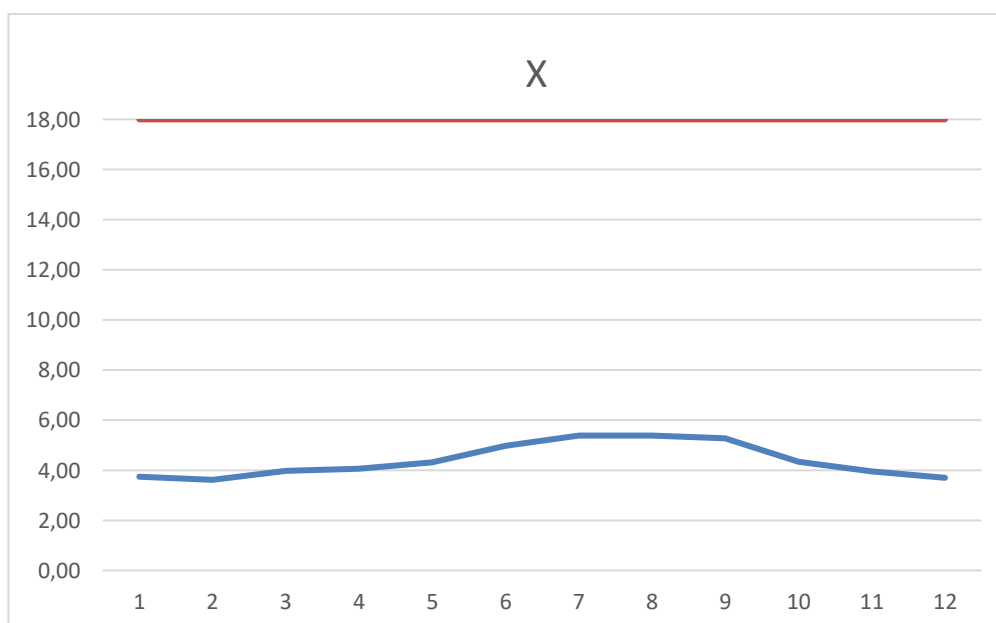


Imagen 54 Evolución del factor de pérdidas

Tanto el factor de pérdidas como el de ganancias se mantienen debajo de los límites impuestos. El factor de ganancia crece en los meses de verano puesto que es directamente proporcional a la radiación e inversamente proporcional a la demanda, la radiación crece en los meses de verano y decrece la demanda, lo que propicia el crecimiento de este factor.

En cuanto al factor de pérdidas, es inversamente proporcional a la demanda y directamente proporcional a la diferencia de la temperatura de referencia con la temperatura ambiente. Al crecer la temperatura ambiente en los meses de verano esta diferencia disminuye, por lo que debería disminuir en los meses de verano el factor de pérdidas, pero la demanda disminuye más, lo que hace que el factor crezca levemente en los meses de verano, sin alcanzar nunca el límite.

Se va a realizar distintas optimizaciones para este caso, es decir, se quiere variar la ocupación y ver para distintas ocupaciones cual es el área y volumen óptimos.

Para el mismo caso en el que se ha calculado el óptimo se va a variar la ocupación para ver cómo varía el punto óptimo. Se va a variar desde 75 a 550 personas en un hotel de 5 estrellas. Se varía desde este límite inferior puesto que al ser 69 litros por persona y día la demanda que se establece, se obtiene 5175 litros al día, y al ser

Sevilla zona 5 se exige que la instalación cumpla como mínimo la cobertura del 70 % de la demanda.

Ocupación [Personas]	L_{anual} [J]	M_{ac} [L/día]	f_{anual}	V/A	V [L]	A [m²]	FO [€]
75	2,37E+14	5175	0,7	58,89	3899	66,22	34480
100	3,16E+14	6900	0,7	58,89	5200	88,3	45974
125	3,95E+14	8625	0,7	58,89	6500	110,4	57467
150	4,74E+14	10350	0,7	58,89	7799	132,4	68961
175	5,53E+14	12075	0,7	58,89	9099	154,5	80454
200	6,32E+14	13800	0,7	58,89	10399	176,6	91948
225	7,11E+14	15525	0,7	58,89	11699	198,7	103441
250	7,90E+14	17250	0,7	58,89	12999	220,7	114935
275	8,69E+14	18975	0,7	58,89	14299	242,8	126428
300	9,47E+14	20700	0,7	58,89	15599	264,9	137922
325	1,03E+15	22425	0,7	58,89	16899	287	149415
350	1,11E+15	24150	0,7	58,89	18199	309	160909
375	1,18E+15	25875	0,7	58,89	19499	331,1	172402
400	1,26E+15	27600	0,7	58,89	20798	353,2	183896
425	1,34E+15	29325	0,7	58,89	22098	375,3	195389
450	1,42E+15	31050	0,7	58,89	23398	397,3	206883
475	1,50E+15	32775	0,7	58,89	24698	419,4	218376
500	1,58E+15	34500	0,7	58,89	25998	441,5	229870
525	1,66E+15	36225	0,7	58,89	27298	463,6	241363
550	1,74E+15	37950	0,7	58,89	28598	485,6	252857

Tabla 15 Optimización para Hotel 5 estrellas

Como se puede observar al aumentar el número de ocupación aumenta el resto de los resultados. Se va a analizar como varían cada uno de esto. La demanda anual en términos energéticos sólo depende de la ocupación, pues la temperatura del agua de red y la demanda de litros por persona está fijado, por lo que crecerá linealmente dependiente de la ocupación que se haya marcado:

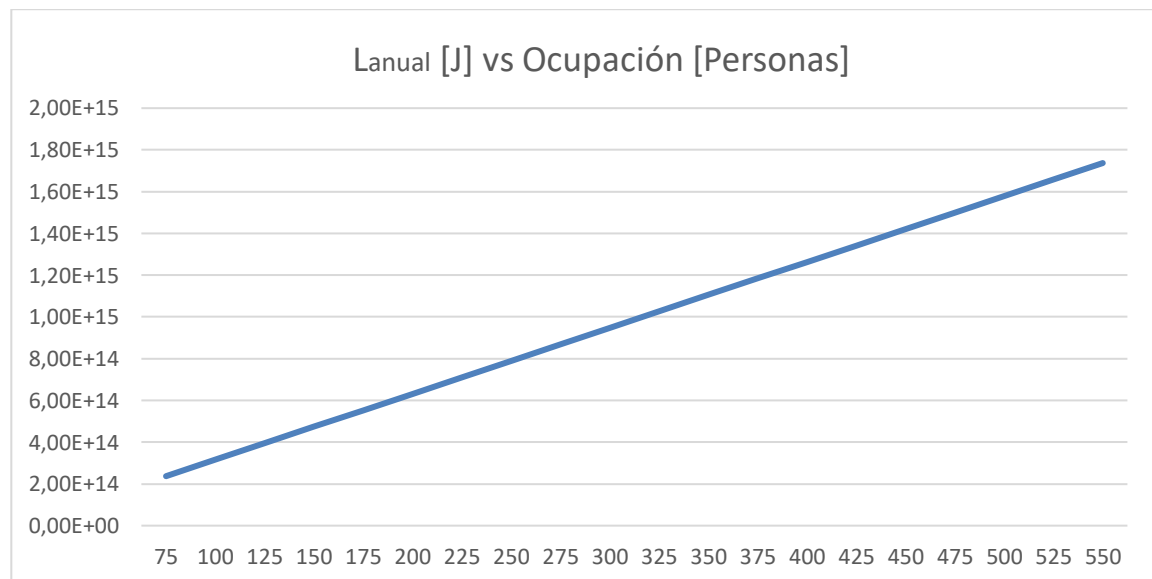


Imagen 55 Hotel 5 estrellas: demanda energética vs ocupación

Los términos económicos tienen dependencia del área y del volumen óptimo elegidos, es decir, la función objetivo será la suma del coste del área y del volumen elegidos, y el óptimo de cada uno de éstos dependerá de la ocupación de cada caso:

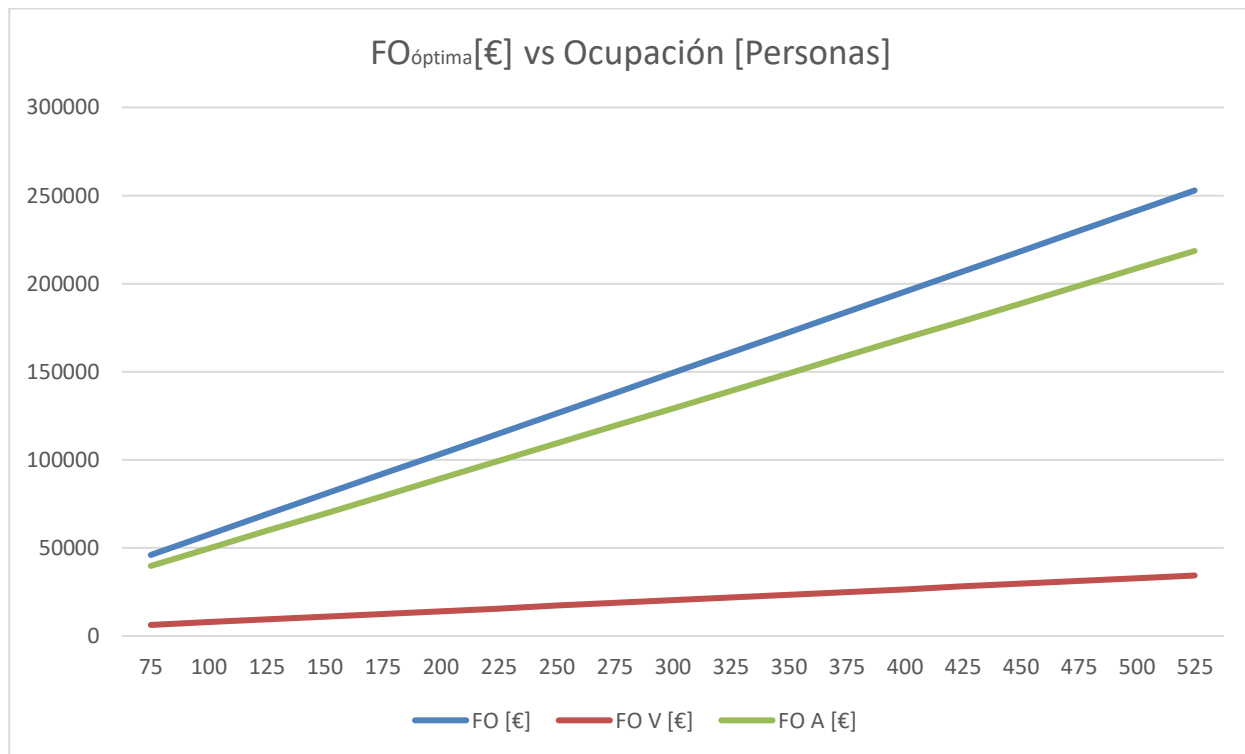


Imagen 56 Hotel 5 estrellas: FO vs ocupación

Tiene un mayor coste la compra de superficies de captación que la de depósitos de inercia, tal y como se comprueba en la gráfica.

La dependencia de este valor económico optimizado se puede prever casi lineal. Se va a obtener dicha ecuación con el EES:

$$FO = 1,13082255 \cdot 10^{-04} + 4,59739562 \cdot 10^{02} \text{ Personas} + \\ + 1,53482065 \cdot 10^{-08} \text{ Personas}^2 - 5,03174547 \cdot 10^{-11} \text{ Personas}^3 \\ + 7,76303196 \cdot 10^{-14} \text{ Personas}^4 - 4,55430667 \cdot 10^{-17} \text{ Personas}^5$$

Con esta ecuación se obtiene un R^2 del 100%, es decir, una aproximación óptima.

El término V/A al realizar la optimización económica, como se puede observar en la tabla anterior, permanece constante. Tras una serie de comprobaciones, de variaciones de parámetros se comprueba que esto sólo depende de la fracción de cobertura de la demanda, en este caso fija en el 70%. Como se comprobará en el siguiente apartado al fijar un f_{anual} .

Lo que interesa realmente es la obtención de una ecuación que termine el área y el volumen en función de f_{anual} y L_{anual} , es decir:

$$A = A(f_{\text{anual}}, L_{\text{anual}})$$

$$V = V(f_{\text{anual}}, L_{\text{anual}})$$

Para ello se va a realizar unas optimizaciones donde f_{anual} adquiera también el valor de 60 %, para ello, puesto que se sigue considerando la situación de Sevilla como localidad, se debe bajar el número de ocupantes para que la demanda diaria sea menor, y de esta forma baje de 5000 litros diarios:

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (l/d) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA
50 - 5000	V
5000 – 10000	60
10000	70

Tabla 16 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V

Por tanto, se variará la ocupación desde 30 ocupantes hasta 610 ocupantes, de forma que se obtenga los suficientes resultados para poder obtener una ecuación lo más próxima a la realidad posible.

$$A = -3,95349088 \cdot 10^{01} + 2,78043500 \cdot 10^{-10} L_{anual} + 6,68952169 \cdot 10^{-25} L_{anual}^2 \\ + 1,35691511 \cdot 10^{01} f_{anual} + 6,27901414 \cdot 10^{01} f_{anual}^2$$

No se puede despreciar ningún término pues la demanda en términos energéticos anual es del orden de $10^{13} - 10^{15}$. Con esta aproximación através de un polinomio de grado dos sin términos cruzados se obtiene R^2 del 100%, por lo que se considera óptima:

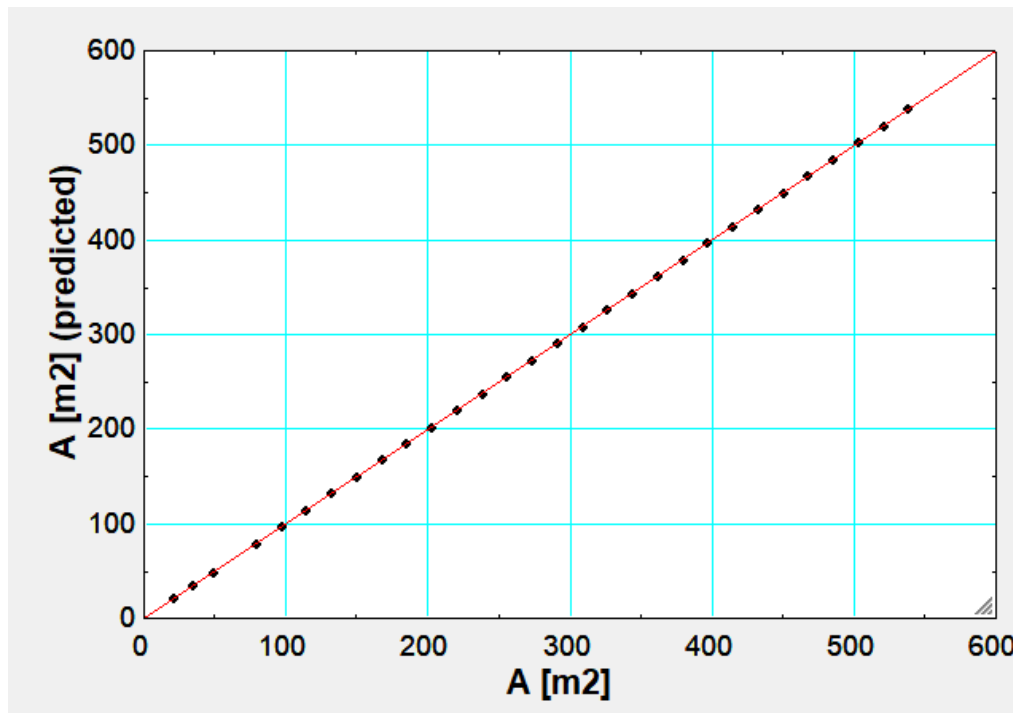


Imagen 57 Área real vs predicción. Hotel 5*. 100%

Como se observa en la imagen anterior facilitada por EES, la aproximación es exacta.

En la imagen siguiente se ha representado la función que se ha obtenido del área, que es dependiente de la demanda en términos energéticos y de la fracción anual que se debe cubrir. Se ha representado en el eje horizontal la demanda en términos energéticos. Se ha representado una recta vertical, que indica el paso de fracción anual cubierta de 0,6 a 0,7. Se ha representado de esta forma porque la demanda en términos energéticos es dependiente de la demanda en términos de litros por unidad de tiempo:

$$L_{anual} = L_{anual}(M_{ac})$$

$$f_{anual} = f_{anual}(M_{ac})$$

Esta demanda de litros diarios hace que varíe la fracción anual media. Esto junto que se encuentra en una localidad situada en zona V hace que al pasar de los 5 000 litros diarios pase dicha fracción de 0,6 a 0,7.

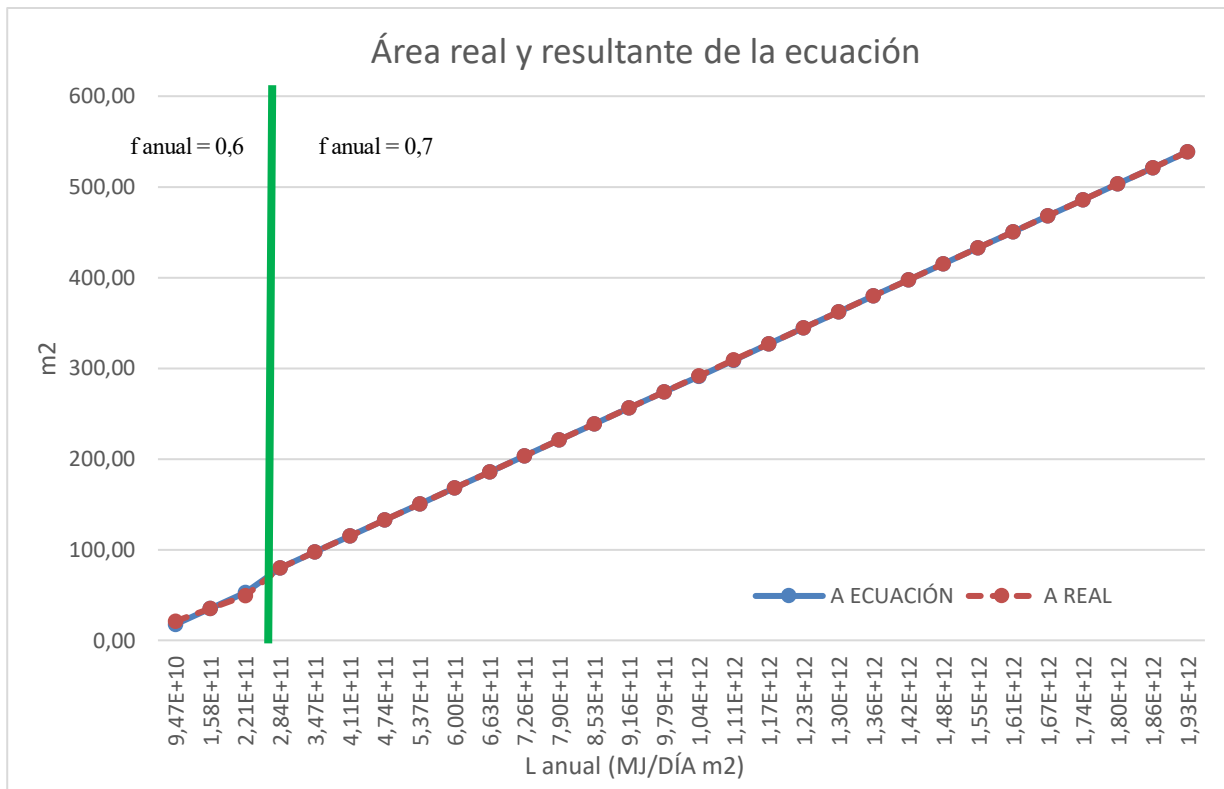


Imagen 58 Area real y resultante de la ecuación. Hotel 5*

Para la obtención de la ecuación del volumen que depende de la fracción de agua caliente por energía solar y la demanda en términos energéticos se tiene la siguiente ecuación:

$$V = -3,67055409 \cdot 10^{03} + 1,63273965 \cdot 10^{-08} L_{anual} + 5,90545962 \cdot 10^{-23} L_{anual}^2 + 1,75638534 \cdot 10^{03} f_{anual} + 5,11344290 \cdot 10^{03} f_{anual}^2$$

Con esta ecuación polinómica de grado dos sin términos cruzado se alcanza el R^2 de un 99,99% de fiabilidad:

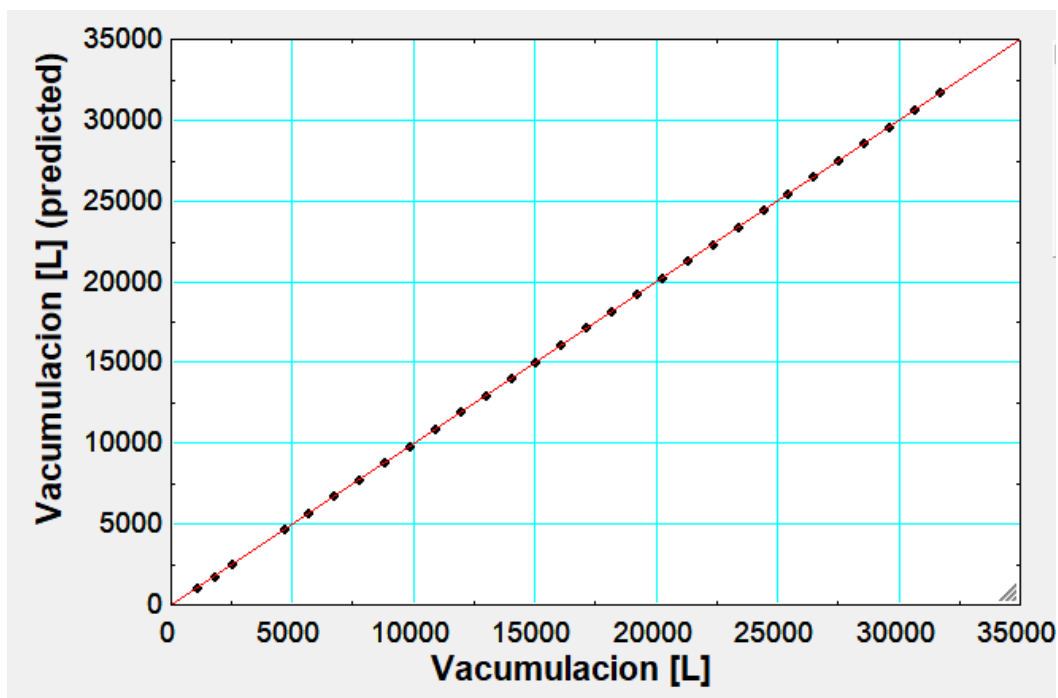


Imagen 59 Volumen real vs predicción. Hotel 5*. 99,99 %

Igual que se ha procedido con la función obtenida del área se ha representado la función obtenida del volumen, quedando de la siguiente forma:



*Imagen 60 Volumen real y resultante de la ecuación. Hotel 5**

Al principio difiere un poco de los resultados reales los obtenidos por la ecuación, pero conforme va aumentando los valores de demanda energética se ajusta completamente la ecuación a los datos obtenidos por la optimización económica.

En la tabla siguiente se muestran las optimizaciones para 30 casos donde se ha variado tan sólo la ocupación del hotel de 5 estrellas y usada para la obtención de la función mostrada anteriormente.

Ocupación [Personas]	M_{ac} [L/día]	L_{anual} [J]	f_{anual}	V/A	V [L]	A [m²]	FO [€]
30	2070	9,47E+13	0,6	51,34	1082	21,08	10785
50	3450	1,58E+14	0,6	51,34	1804	35,13	17975
70	4830	2,21E+14	0,6	51,34	2526	49,19	25165
90	6210	2,84E+14	0,7	58,89	4680	79,47	41377
110	7590	3,47E+14	0,7	58,89	5720	97,13	50571
130	8970	4,11E+14	0,7	58,89	6759	114,8	59766
150	10350	4,74E+14	0,7	58,89	7799	132,4	68961
170	11730	5,37E+14	0,7	58,89	8839	150,1	78156
190	13110	6,00E+14	0,7	58,89	9879	167,8	87351
210	14490	6,63E+14	0,7	58,89	10919	185,4	96545
230	15870	7,26E+14	0,7	58,89	11959	203,1	105740
250	17250	7,90E+14	0,7	58,89	12999	220,7	114935
270	18630	8,53E+14	0,7	58,89	14039	238,4	124130
290	20010	9,16E+14	0,7	58,89	15079	256,1	133324
310	21390	9,79E+14	0,7	58,89	16119	273,7	142519

330	22770	1,04E+15	0,7	58,89	17159	291,4	151714
350	24150	1,11E+15	0,7	58,89	18198	309	160909
370	25530	1,17E+15	0,7	58,89	19238	326,7	170104
390	26910	1,23E+15	0,7	58,89	20278	344,4	179298
410	28290	1,30E+15	0,7	58,89	21318	362	188493
430	29670	1,36E+15	0,7	58,89	22358	379,7	197688
450	31050	1,42E+15	0,7	58,89	23398	397,3	206883
470	32430	1,48E+15	0,7	58,89	24438	415	216078
490	33810	1,55E+15	0,7	58,89	25478	432,7	225272
510	35190	1,61E+15	0,7	58,89	26518	450,3	234467
530	36570	1,67E+15	0,7	58,89	27558	468	243662
550	37950	1,74E+15	0,7	58,89	28598	485,6	252857
570	39330	1,80E+15	0,7	58,89	29638	503,3	262052
590	40710	1,86E+15	0,7	58,89	30677	521	271246
610	42090	1,93E+15	0,7	58,89	31717	538,6	280441

Tabla 17 Optimización para Hotel 5 estrellas

Todos los resultados responden coherentemente, pues crecen con el incremento de ocupación. Como se ha comentado anteriormente la relación V/A queda fijada con f_{anual} .

Vivienda

Para la instalación en un edificio de viviendas multifamiliares hay que seguir el Documento Básico HE Ahorro de la energía, pues marca una serie de particularidades que no habría que seguir en instalaciones de otro tipo de edificios. En primer lugar, hay que seleccionar el número de dormitorios que habrá en cada piso. En este caso, se ha seleccionado tres dormitorios, por tanto, corresponde a 4 personas habitando en cada piso para el cálculo de la demanda de agua caliente.

Número de dormitorios	1	2	3	4	5	6	≥ 6
Número de personas	1,5	3	4	5	6	6	7

Tabla 18 Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado

Además, en los edificios de vivienda multifamiliares se utilizará un factor de centralización correspondiente al número de viviendas del edificio que multiplicará la demanda diaria de agua caliente sanitaria a 60 °C calculada. Este factor de centralización sólo aparece su uso en el caso del cálculo de la demanda de agua caliente en viviendas multifamiliares.

Número de viviendas	$N \leq 3$	$4 \leq N \leq 10$	$11 \leq N \leq 20$	$21 \leq N \leq 50$	$51 \leq N \leq 75$	$76 \leq N \leq 100$	$N \geq 101$
Factor de centralización	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70

Tabla 19 Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado

Se va a fijar el número de dormitorios en 3, por tanto, se fija en 4 personas por piso para calcular la demanda. Se va a variar el número de viviendas, por lo que variará la demanda de litros diarios, esto implicará que, para algunos valores, puesto que se localiza en zona V, se imponga un valor de cobertura de demanda del agua caliente del 60 %, y para otros 70%. Ya que se variará el número de viviendas en factor de centralización por el que hay que multiplicar la demanda cambiará.

En la siguiente tabla se muestra como al variar el número de viviendas afecta al resto de parámetros.

<i>NV</i>	<i>FC</i>	<i>Ocupación</i> [Personas]	<i>M_{ac}</i> [L/día]	<i>L_{anual}</i> [J]	<i>f_{anual}</i>	<i>V/A</i>	<i>V</i> [L]	<i>A</i> [m ²]	<i>FO</i> [€]
4	0,95	16	425,6	1,95E+10	0,6	51,34	222,5	4	2217
6	0,95	24	638,4	2,92E+10	0,6	51,34	333,8	7	3326
8	0,95	32	851,2	3,90E+10	0,6	51,34	445,1	9	4435
10	0,95	40	1064	4,87E+10	0,6	51,34	556,4	11	5544
12	0,9	48	1209,6	5,54E+10	0,6	51,34	632,5	12	6302
14	0,9	56	1411,2	6,46E+10	0,6	51,34	737,9	14	7353
16	0,9	64	1612,8	7,38E+10	0,6	51,34	843,3	16	8403
18	0,9	72	1814,4	8,31E+10	0,6	51,34	948,7	18	9453
20	0,9	80	2016	9,23E+10	0,6	51,34	1054	21	10504
22	0,85	88	2094,4	9,59E+10	0,6	51,34	1095	21	10912
24	0,85	96	2284,8	1,05E+11	0,6	51,34	1195	23	11904
26	0,85	104	2475,2	1,13E+11	0,6	51,34	1294	25	12896
28	0,85	112	2665,6	1,22E+11	0,6	51,34	1394	27	13888
30	0,85	120	2856	1,31E+11	0,6	51,34	1493	29	14880
32	0,85	128	3046,4	1,39E+11	0,6	51,34	1593	31	15872
34	0,85	136	3236,8	1,48E+11	0,6	51,34	1692	33	16865
36	0,85	144	3427,2	1,57E+11	0,6	51,34	1792	35	17857
38	0,85	152	3617,6	1,66E+11	0,6	51,34	1892	37	18849
40	0,85	160	3808	1,74E+11	0,6	51,34	1991	39	19841
42	0,85	168	3998,4	1,83E+11	0,6	51,34	2091	41	20833
44	0,85	176	4188,8	1,92E+11	0,6	51,34	2190	43	21825
46	0,85	184	4379,2	2,00E+11	0,6	51,34	2290	45	22817
48	0,85	192	4569,6	2,09E+11	0,6	51,34	2389	47	23809
50	0,85	200	4760	2,18E+11	0,6	51,34	2489	48	24801
52	0,8	208	4659,2	2,13E+11	0,6	51,34	2436	47	24276
54	0,8	216	4838,4	2,22E+11	0,6	51,34	2530	49	25209
56	0,8	224	5017,6	2,30E+11	0,7	58,89	3781	64	33432
58	0,8	232	5196,8	2,38E+11	0,7	58,89	3916	67	34626
60	0,8	240	5376	2,46E+11	0,7	58,89	4051	69	35820
62	0,8	248	5555,2	2,54E+11	0,7	58,89	4186	71	37014
64	0,8	256	5734,4	2,63E+11	0,7	58,89	4321	73	38208
66	0,8	264	5913,6	2,71E+11	0,7	58,89	4456	76	39402
68	0,8	272	6092,8	2,79E+11	0,7	58,89	4591	78	40596
70	0,8	280	6272	2,87E+11	0,7	58,89	4726	80	41790
72	0,8	288	6451,2	2,95E+11	0,7	58,89	4861	83	42984
74	0,8	296	6630,4	3,04E+11	0,7	58,89	4996	85	44178
76	0,75	304	6384	2,92E+11	0,7	58,89	4811	82	42536
78	0,75	312	6552	3,00E+11	0,7	58,89	4937	84	43655
80	0,75	320	6720	3,08E+11	0,7	58,89	5064	86	44775
82	0,75	328	6888	3,15E+11	0,7	58,89	5191	88	45894

Tabla 20 Optimización para viviendas multifamiliares

Siendo:

NV : Número de viviendas

FC : Factor centralización

Como se puede observar en la tabla anterior el valor de las áreas y los volúmenes no crecen continuamente al aumentar el número de viviendas, pues el factor de centralización por el que hay que multiplicar la demanda va bajando con el aumento del número de viviendas:

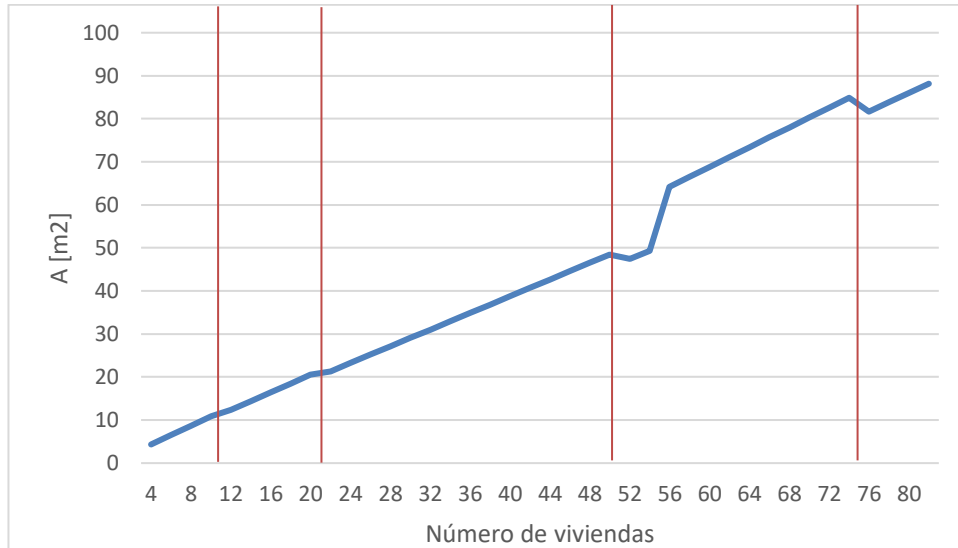


Imagen 61 Edificio de viviendas. Área de captación frente número de viviendas

Cada línea roja vertical representa un cambio en el factor de centralización, disminuyéndolo cada vez más conforme va creciendo el número de viviendas, por ello en el cruce con cada línea roja existe un salto en la representación gráfica.

Lo que interesa realmente es la obtención de una ecuación que termine el área y el volumen en función de f_{anual} y L_{anual} , es decir:

$$A = A(f_{anual}, L_{anual})$$

$$V = V(f_{anual}, L_{anual})$$

Para deducir la función del área que depende de la fracción anual y la demanda energética anual, se prueba con un polinomio de grado dos y sin términos cruzados:

$$A = -3,35907810 \cdot 10^{01} - 1,50750810 \cdot 10^{00} f_{anual} + 9,98604290 \cdot 10^{01} f_{anual}^2 + 1,89119410 \cdot 10^{-10} L_{anual} + 1,39191278 \cdot 10^{-22} L_{anual}^2$$

Con ésta se obtiene una fiabilidad del 99,97 %:

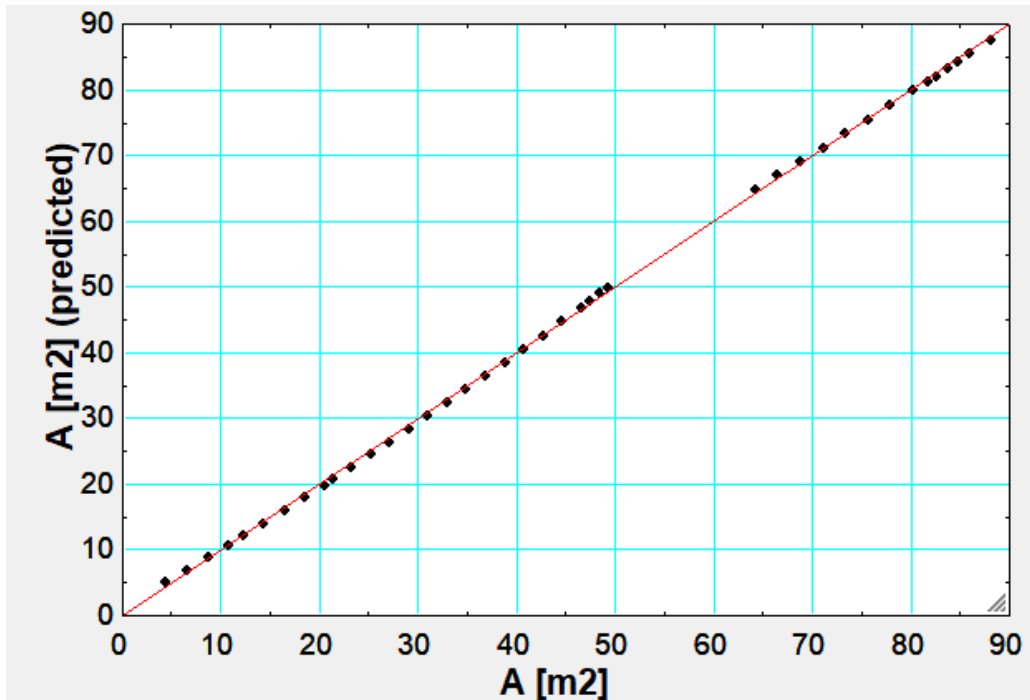


Imagen 62 Área real vs predicción. Edificio de viviendas. 99,97 %

Se va a comprobar con la adición de términos cruzados en el polinomio de grado dos cual es la fiabilidad que presenta:

$$A = -5,64332261 \cdot 10^{00} + 1,74674271 \cdot 10^{01} f_{anual} - 1,34364824 \cdot 10^{01} f_{anual}^2 \\ - 1,20032547 \cdot 10^{-10} L_{anual} + 3,90189526 \cdot 10^{-37} L_{anual}^2 \\ + 5,70889967 \cdot 10^{-10} f_{anual} L_{anual}$$

Se obtiene una fiabilidad del 100 %, tal y como refleja la imagen siguiente. Se coge esta última expresión como aquella que representa la evolución del área en función de la fracción y demanda anual para obtener el óptimo económico.

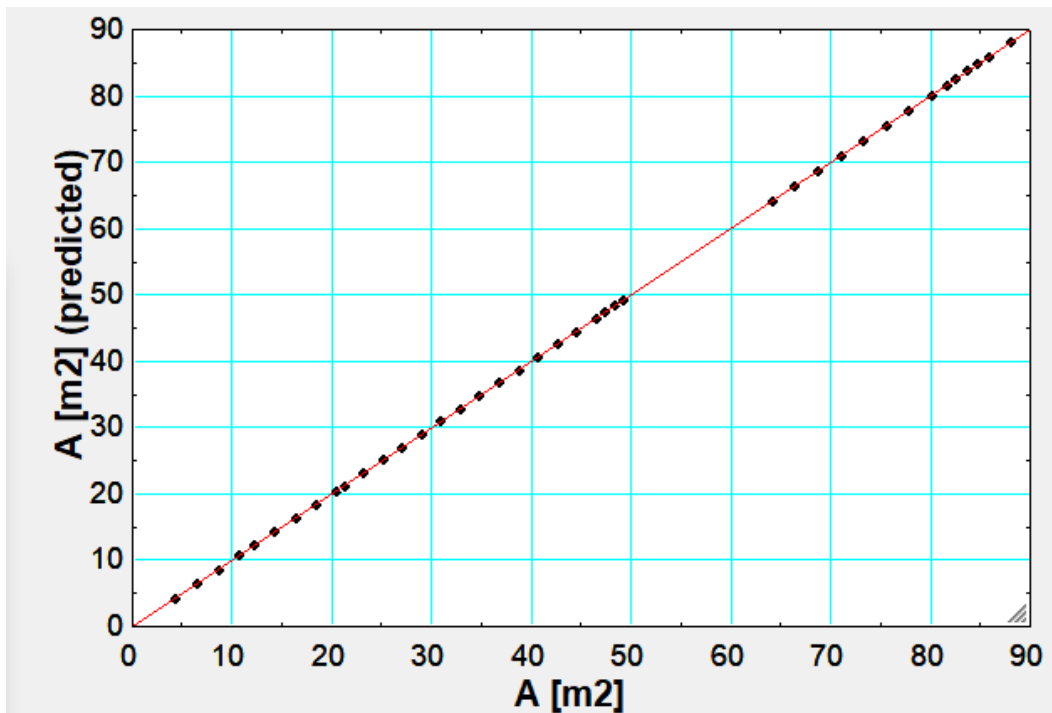


Imagen 63 Área real vs predicción. Edificio de viviendas. 100 %

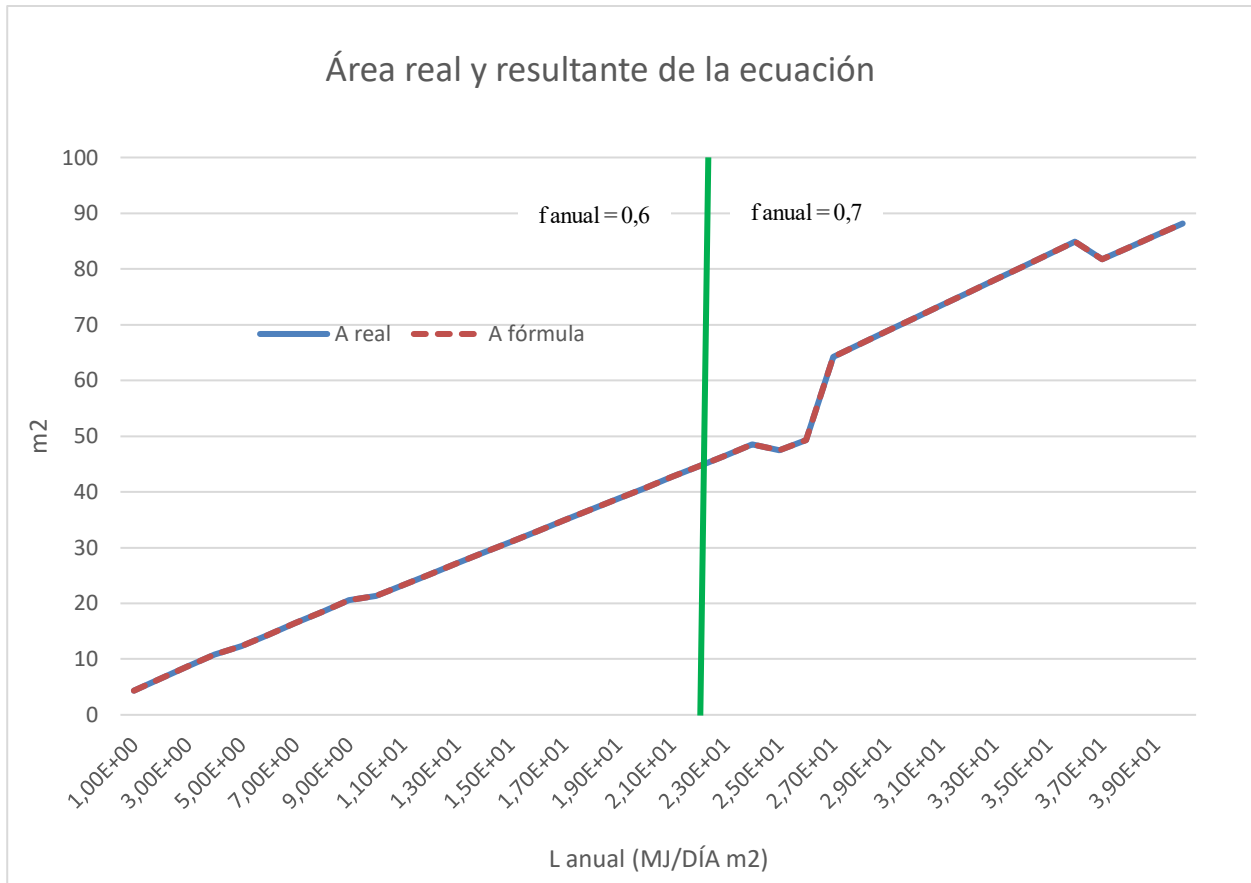


Imagen 64 Área real y resultante de la ecuación. Viviendas

Igual que se procedió en el caso del hotel de cinco estrellas, se representan los datos obtenidos en el EES resultantes de la optimización económica (Imagen 64), es decir, la minimización de la función objetivo, junto a la ecuación de segundo grado con términos cruzados obtenidos de la aproximación a estos datos. Ya que se ha llegado a una aproximación del 100% las áreas reales son iguales a las obtenidas de la ecuación. Se observa que no sigue una tendencia lineal, presenta unos “saltos”, debido al cambio de factor de centralización. El factor de centralización dependerá del número de viviendas y el número de viviendas impodrá a su vez la demanda de litros diarios, y por consiguiente la demanda en términos energéticos que se representa en el eje horizontal.

$$FC = FC(\text{número de viviendas})$$

$$M_{ac} = M_{ac}(FC, \text{número de viviendas})$$

$$L_{anual} = L_{anual}(M_{ac})$$

De la misma forma se va a proceder con la ecuación del volumen, y su posterior representación. Para la obtención de la ecuación polinómica del volumen dependiente de f_{anual} y L_{anual} , en primer lugar, no se van a introducir términos cruzados, y se obtendrá una fiabilidad del 99,94%:

$$V = -2,99667561 \cdot 10^3 - 3,61801943 \cdot 10^1 f_{anual} + 8,74106423 \cdot 10^3 f_{anual}^2 + 8,47724443 \cdot 10^{-09} L_{anual} + 1,22877017 \cdot 10^{-20} L_{anual}^2$$

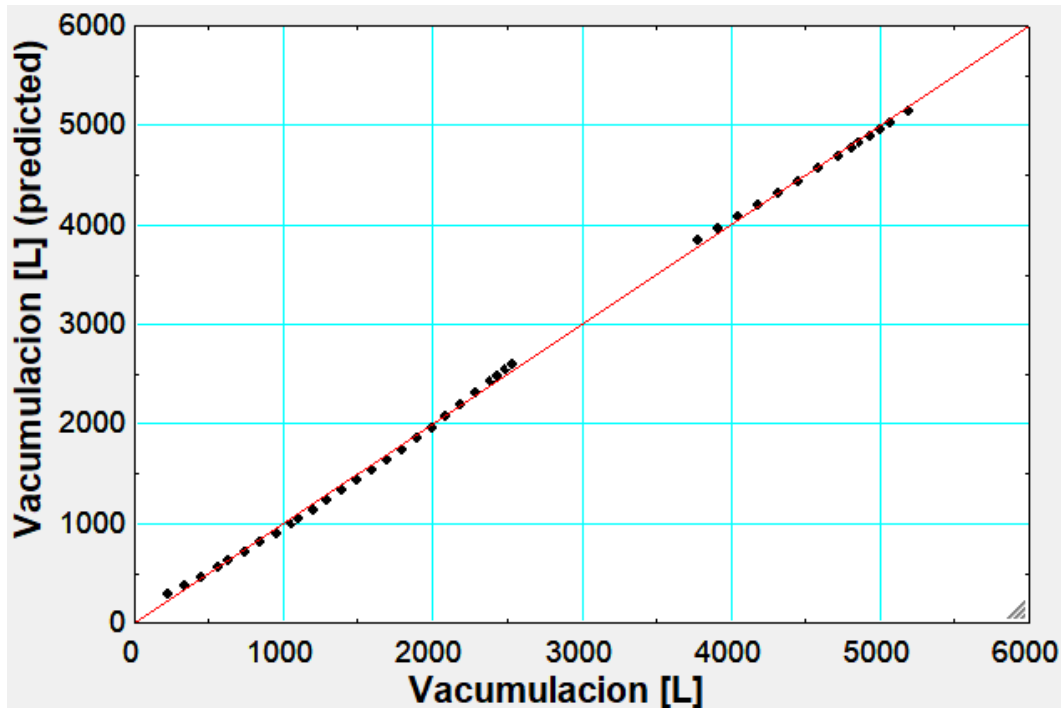


Imagen 65 Volumen real vs predicción. Edificio de viviendas. 99,94 %

Se va a intentar elevar la fiabilidad si que crezca el número de términos de la ecuación de una forma desorbitada, para ello se va a intentar introduciendo términos cruzado en la función polinómica de grado dos, lo que normalmente suele conllevar a una mayor fiabilidad:

$$V_{\text{vacumulación}} = -5,30298363 \cdot 10^{02} + 1,64139969 \cdot 10^{03} f_{\text{anual}} - 1,26261515 \cdot 10^{03} f_{\text{anual}}^2 \\ - 1,88144586 \cdot 10^{-08} L_{\text{anual}} + 1,20054375 \cdot 10^{-34} L_{\text{anual}}^2 \\ + 5,03977385 \cdot 10^{-08} f_{\text{anual}} L_{\text{anual}}$$

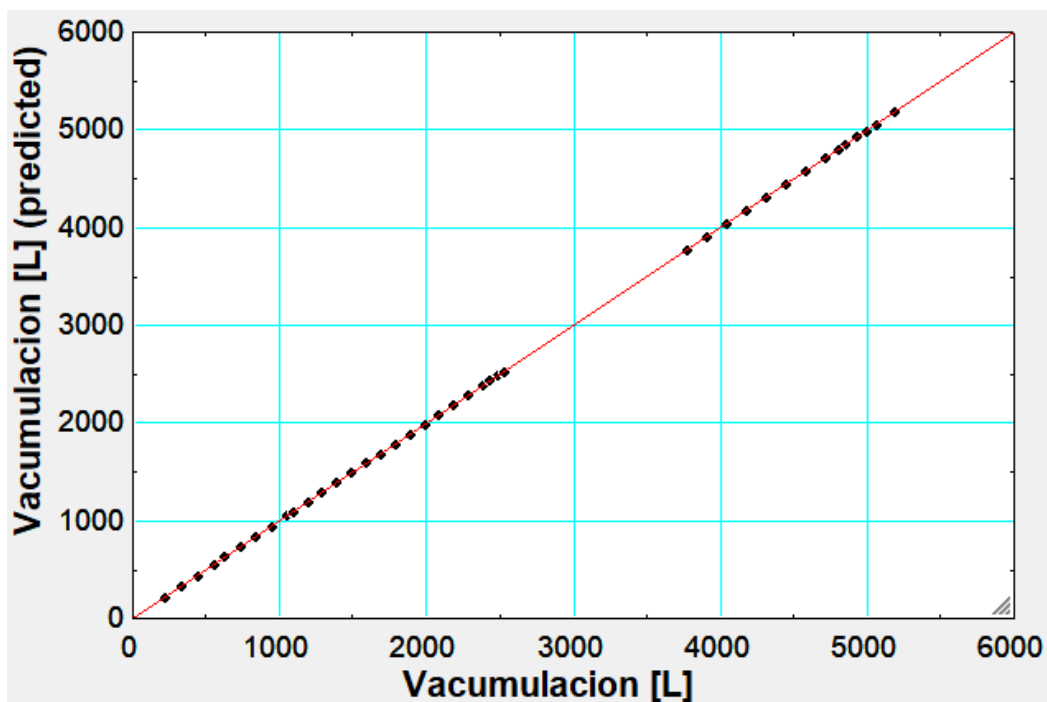


Imagen 66 Volumen real vs predicción. Edificio de viviendas. 100 %

En la siguiente imagen se representa la ecuación obtenida respectiva al volumen y los datos reales. Sigue la misma tendencia que la ecuación referente al área, debido al cambio de fracción anual y de factores de centralización.

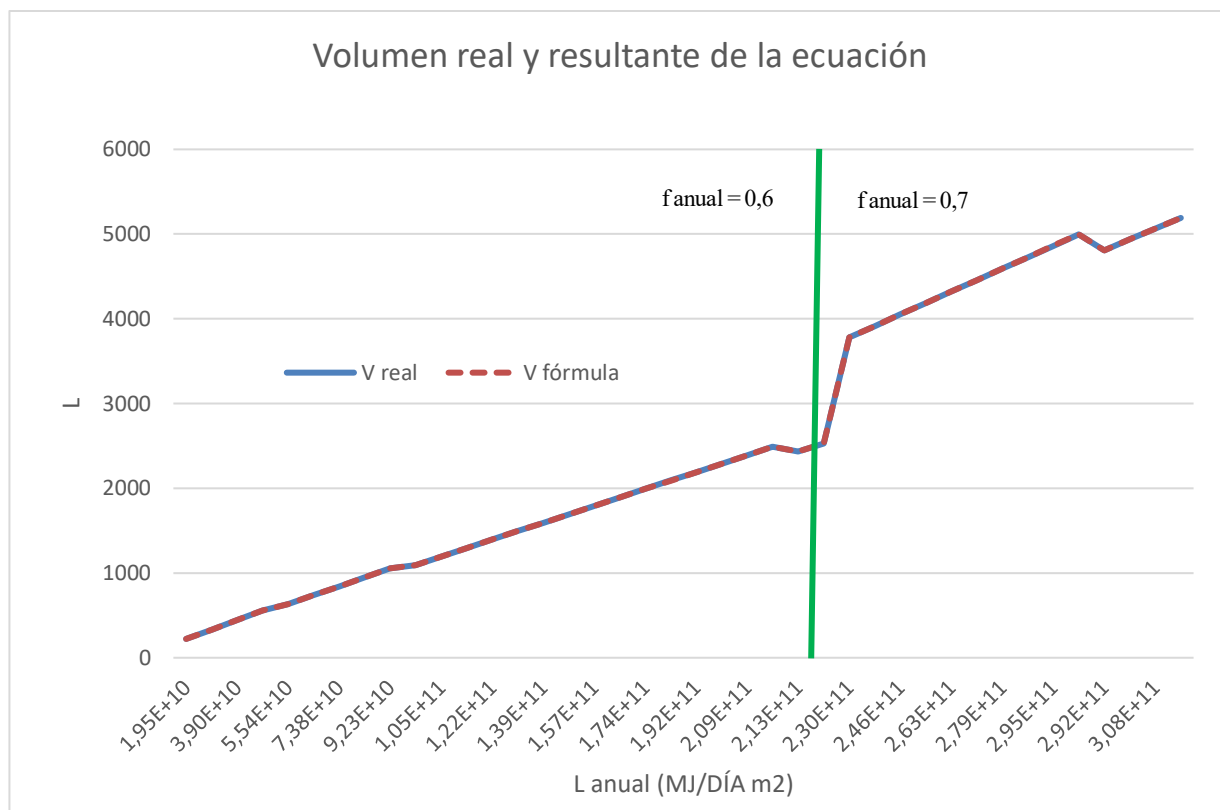


Imagen 67 Volumen real y resultante de la ecuación. Viviendas

Residencia

Puesto que se ha comprobado cómo evolucionan los resultados para el mayor criterio de demanda que son 69 litros por persona y día correspondiente a un hotel de cinco estrellas, e igualmente se ha comprobado en el caso de una vivienda, que es el más común y tiene una demanda notablemente menor de 28 litros por persona y día, o incluso menor debido al factor de centralización, a continuación se va a realizar con una residencia, donde la demanda de litros diarios por persona es intermedio entre ambos, 41 litros por persona y día.

A continuación, se representa la tabla de datos en la que se ha basado el *EES* para la obtención de las funciones que se van a obtener posteriormente. Se ha procedido de la misma forma que en los casos anteriores, aumentando la ocupación, y por consiguiente, la demanda que tiene que cubrir la instalación de captadores solares. Se ha optimizado para cada caso en función de la relación V/A para obtener el menor coste posible.

Ocupación [Personas]	M_{ac} [L/día]	L_{anual} [J]	f_{anual}	V/A	V [L]	A [m ²]	FO [€]
15	615	2,82E+10	0,6	51,34	321,6	6,263	3204
35	1435	6,57E+10	0,6	51,34	750,3	14,61	7477
55	2255	1,03E+11	0,6	51,34	1179	22,96	11749
75	3075	1,41E+11	0,6	51,34	1608	31,32	16022
95	3895	1,78E+11	0,6	51,34	2037	39,67	20294
115	4715	2,16E+11	0,6	51,34	2465	48,02	24566
135	5535	2,53E+11	0,7	58,89	4171	70,83	36879
155	6355	2,91E+11	0,7	58,89	4789	81,32	42343
175	7175	3,28E+11	0,7	58,89	5407	91,82	47806
195	7995	3,66E+11	0,7	58,89	6025	102,3	53270
215	8815	4,04E+11	0,7	58,89	6643	112,8	58733

235	9635	4,41E+11	0,7	58,89	7261	123,3	64197
255	10455	4,79E+11	0,7	58,89	7878	133,8	69661
275	11275	5,16E+11	0,7	58,89	8496	144,3	75124
295	12095	5,54E+11	0,7	58,89	9114	154,8	80588
315	12915	5,91E+11	0,7	58,89	9732	165,3	86051
335	13735	6,29E+11	0,7	58,89	10350	175,8	91515
355	14555	6,66E+11	0,7	58,89	10968	186,3	96978
375	15375	7,04E+11	0,7	58,89	11586	196,8	102442
395	16195	7,41E+11	0,7	58,89	12204	207,2	107906
415	17015	7,79E+11	0,7	58,89	12822	217,7	113369
435	17835	8,16E+11	0,7	58,89	13440	228,2	118833
455	18655	8,54E+11	0,7	58,89	14058	238,7	124296
475	19475	8,91E+11	0,7	58,89	14676	249,2	129760
495	20295	9,29E+11	0,7	58,89	15294	259,7	135223
515	21115	9,66E+11	0,7	58,89	15911	270,2	140687
535	21935	1,00E+12	0,7	58,89	16529	280,7	146151
555	22755	1,04E+12	0,7	58,89	17147	291,2	151614
575	23575	1,08E+12	0,7	58,89	17765	301,7	157078
595	24395	1,12E+12	0,7	58,89	18383	312,2	162541

Tabla 21 Optimización para residencia

De la misma forma que se ha procedido en los casos anteriores se van a obtener las funciones polinómicas para la obtención del valor óptimo de área y el de volumen. En primer lugar, para calcular la función polinómica que defina el valor del área se va a probar con una función polinómica de grado dos sin términos cruzados. Al comprobar que esta ecuación obtendría un grado de fiabilidad del 99,98 % se da por válida, y no se prueba con una función polinómica de grado dos con términos cruzados.

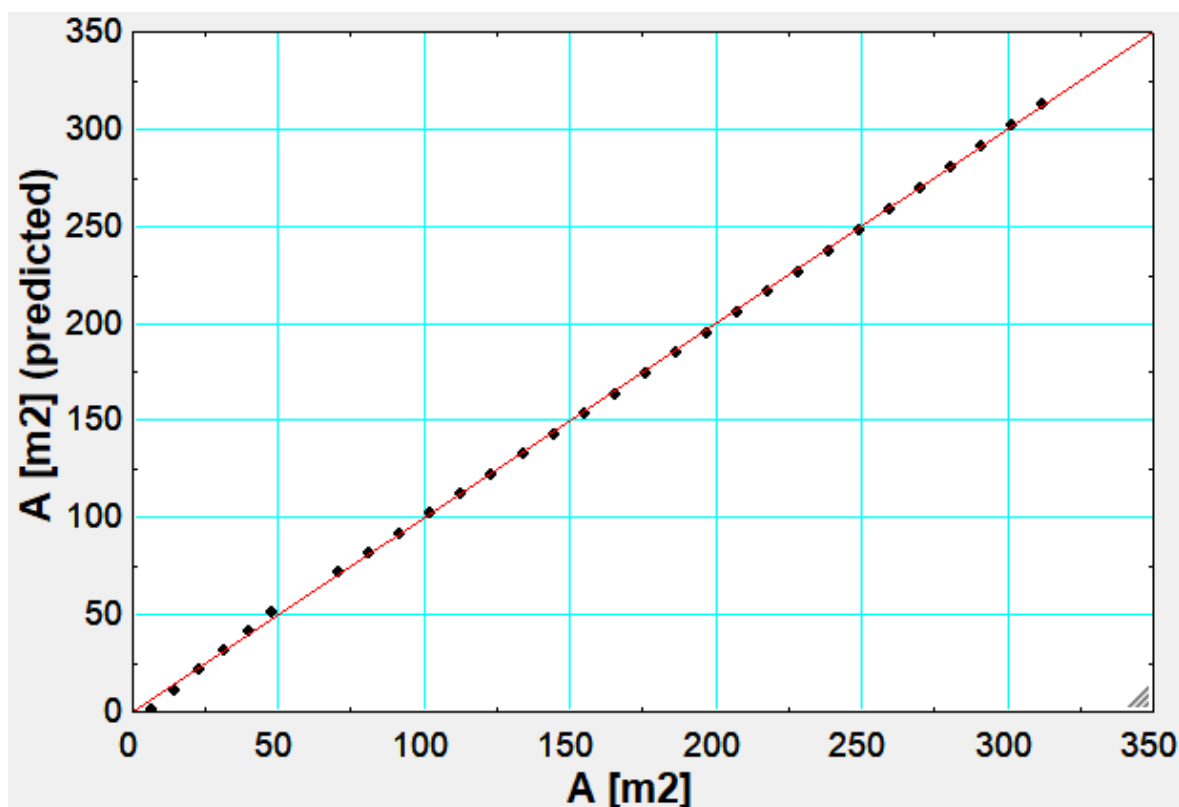


Imagen 68 Área real vs predicción. Residencia. 99,98 %

$$A = -3,63112074 \cdot 10^{01} + 2,60818674 \cdot 10^{-10} L_{\text{anual}} + 1,32414403 \cdot 10^{-23} L_{\text{anual}}^2 \\ + 5,63044553 \cdot 10^{00} f_{\text{anual}} + 7,77990855 \cdot 10^{01} f_{\text{anual}}^2$$

Al representar la ecuación junto con los datos resultantes de la ptimización económica se comprueba que las rectas obtenidas están prácticamente superpuestas, por lo que la exactitud es alta. Se ha delimitado, al igual que en los casos anteriores, el punto en el que la fracción de demanda anual pasa de 0,6 a 0,7.

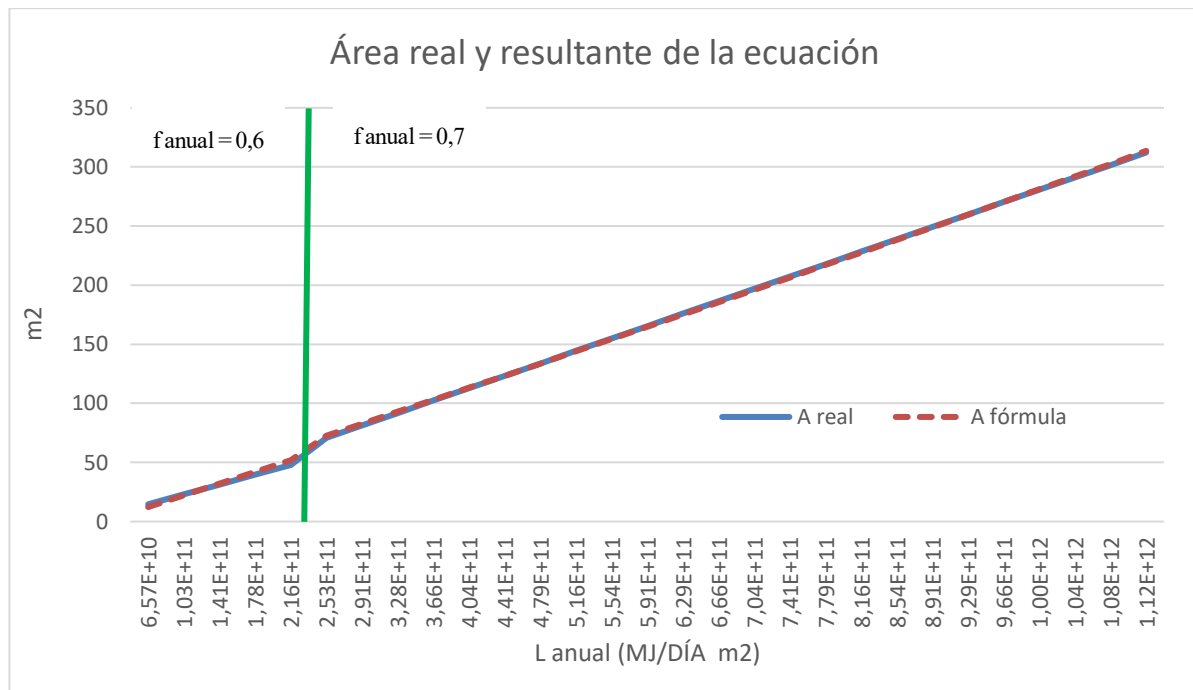


Imagen 69 Área real y resultante de la ecuación. Residencia

Al igual que en el caso del área, para calcular la función que define el valor del volumen, basta con una función de grado dos sin términos cruzados para obtener una precisión del 99,95 %. Tal y como se muestra en la siguiente figura, los valores difieren al principio, es decir, cuando los valores de demanda son menores.

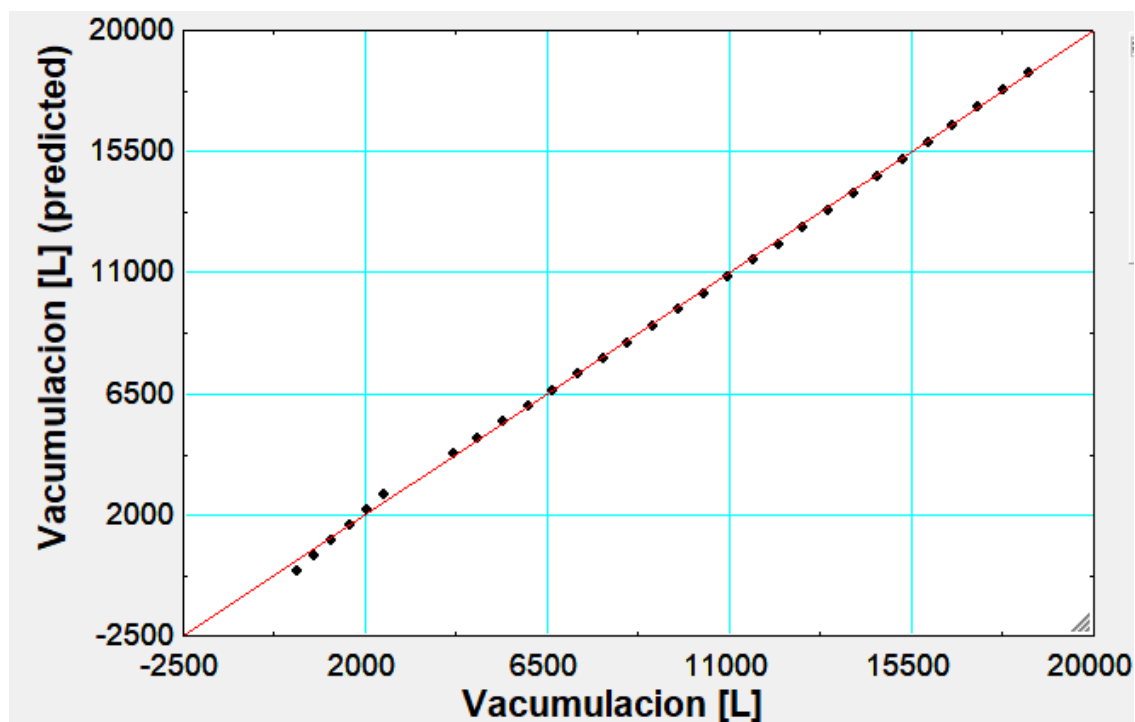


Imagen 70 Volumen real vs predicción. Residencia. 99,95 %

$$V_{\text{acumulación}} = -3,38934254 \cdot 10^{03} + 1,48068018 \cdot 10^{-08} L_{\text{anual}} + 1,16894443 \cdot 10^{-21} L_{\text{anual}}^2 + 1,06600692 \cdot 10^{03} f_{\text{anual}} + 6,43038696 \cdot 10^{03} f_{\text{anual}}^2$$

Al representar la ecuación anterior junto con los resultados óptimos de volumen se observa el grado de exactitud que apuntaba el *EES* del 99,95%.

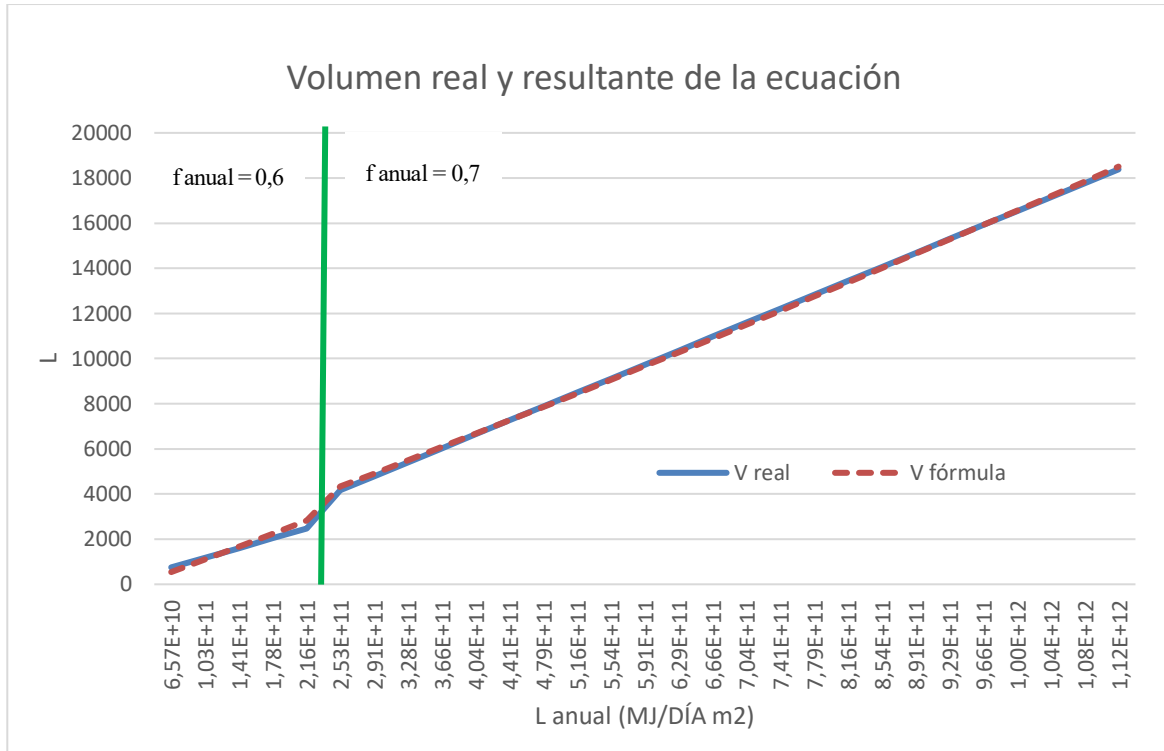


Imagen 71 Volumen real y resultante de la ecuación. Residencia

4.4. Relación $f_{\text{anual}} - V/A$

Cuando se optimiza la función objetivo, es decir, se encuentra el mínimo de la función que representa el coste económico, en función de la relación V/A dentro de los límites impuestos por el reglamento ($50 < V/A < 180$) se ha podido observar en los ejemplos anteriores que se consigue un valor de V/A en función del f_{anual} impuesto. La fracción anual a cubrir viene impuesta por la localización y por la demanda de litros diarios, y con ésta queda fija la relación del volumen de acumulación y al área de captación. Se ha realizado distintas variaciones de todos los parámetros para comprobar de que depende esta relación, y tan solo cambia su valor si se cambia f_{anual} . De la misma forma que se ha procedido en los ejemplos de los apartados anteriores se va a obtener la función que de como resultado el valor de la relación V/A en función de f_{anual} :

$$\frac{V}{\bar{A}_{\text{óptimo económico}}} = -3,27084655 \cdot 10^{02} + 1,64534649 \cdot 10^{03} f_{\text{anual}} - 2,46608703 \cdot 10^{03} f_{\text{anual}}^2 + 1,29046182 \cdot 10^{03} f_{\text{anual}}^3$$

Con esta función polinómica de grado tres se obtiene una fiabilidad del 99,99 %. En la siguiente imagen se comprueba la exactitud que se alcanza con la representación de V/A frente V/A previsto por la ecuación:

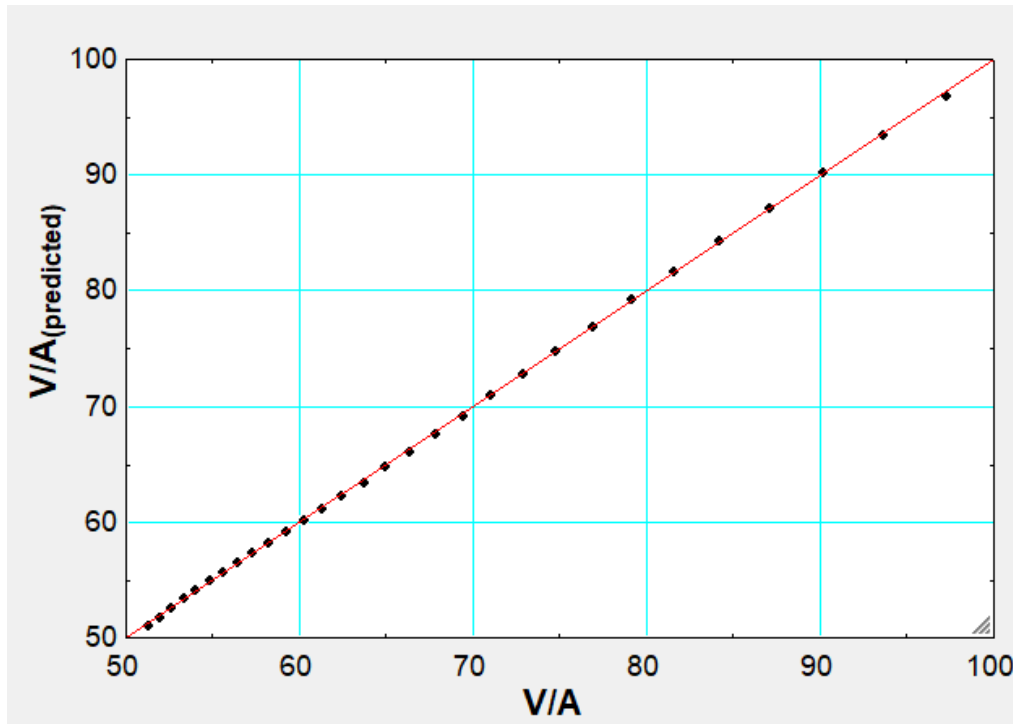


Imagen 72 V/A vs V/A predicción. 99,99 %

A continuación, se representa la evolución de V/A resultante de optimizar la función objetivo de costes:

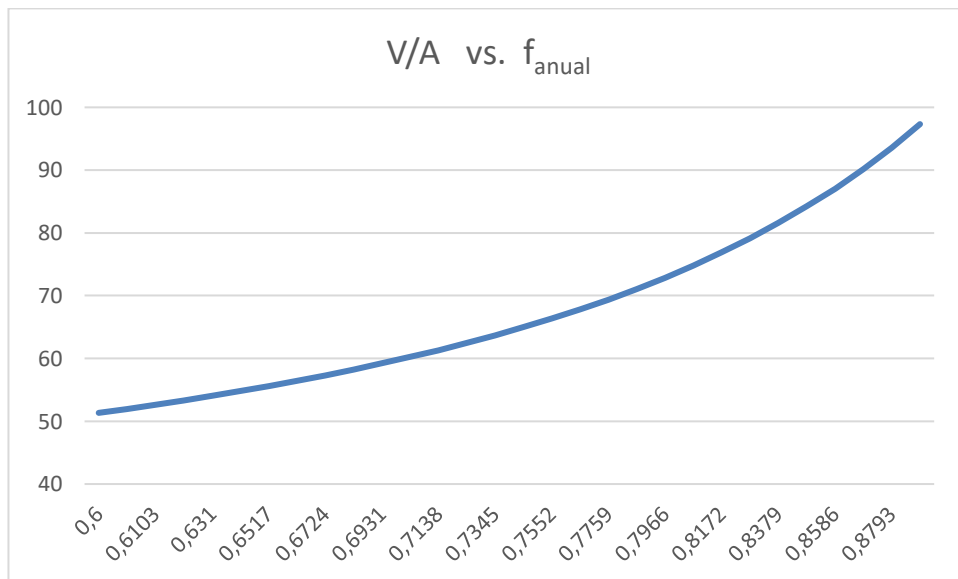


Imagen 73 Evolución de $V/A_{\text{óptimo}}$ frente f_{anual}

Con esta representación gráfica se concluye que al aumentar la fracción de demanda anual a cubrir el óptimo económico que se obtiene es una mayor relación de V/A , esto implica un mayor crecimiento del volumen que del área:

$$\frac{V}{A} \uparrow$$



$V \uparrow \uparrow$ y $A \uparrow$: Este caso es el más probable, que aumente el volume de acumulación más que lo que lo hace el área.

ó

$A \downarrow$ Este caso no puede ser, puesto que para aumentar la fracción de cobertura de la demanda se debe aumentar el área de captación, no disminuirla.

4.5. Fracciones mensuales

Para todos los casos se obtienen los mismos valores de fracciones mensuales de cobertura de demanda, al definir la ubicación en la que se encuentra, en este caso en Sevilla.

Los valores obtenidos mensualmente de fracción de demanda de agua caliente cubierta son los reflejados en las siguientes tablas. Los más bajos son los obtenidos en los meses de enero y diciembre, y los más altos en los meses de verano, tal y como se esperaba, no superando en ningún momento los valores de sobrecalentamiento del 100 %, anteriormente explicado.

f_{anual} 60%

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
0,4454	0,5149	0,5636	0,5919	0,6593	0,7047
f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}
0,7873	0,808	0,7363	0,6296	0,5126	0,4284

Tabla 22 Valores mensuales de fracción mensual en Sevilla con fracción anual de 0,6

f_{anual} 70%

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
0,5356	0,6134	0,6658	0,6961	0,7665	0,81
f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}
0,8892	0,9091	0,8401	0,7352	0,6101	0,5164

Tabla 23 Valores mensuales de fracción mensual en Sevilla con fracción anual de 0,7

Y su representación gráfica queda de la siguiente forma:

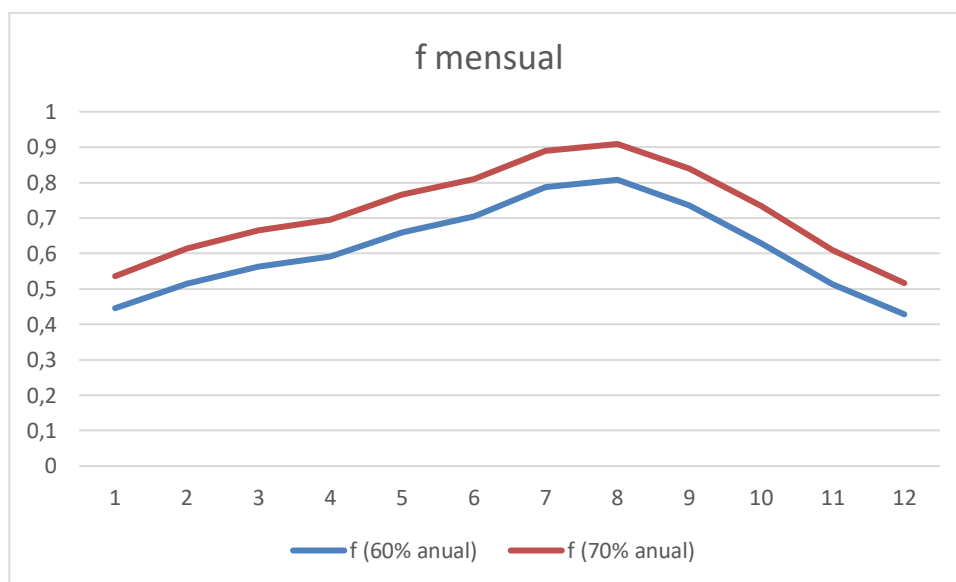


Imagen 74 f mensual

Con esto se deduce que no sería posible cubrir la demanda de agua caliente totalmente, sería necesario el uso de un sistema auxiliar de caldera. En la siguiente imagen se representa el porcentaje que debe de cubrir la caldera mensualmente para el caso de cobertura anual del 40% y del 30 %:

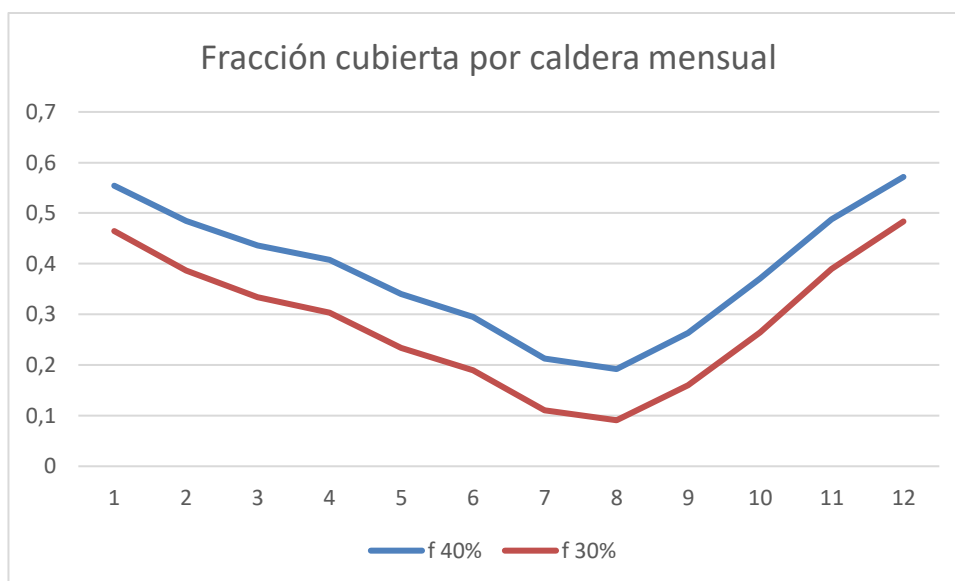


Imagen 75 Cobertura porcentual mensual de la caldera

4.6. Factores de ganancias y de pérdidas

En cuanto a los factores de ganancias y pérdidas ocurre lo mismo que con las fracciones mensuales de cobertura, que quedan determinadas por el captador y la localidad, por ello se obtienen los siguientes resultados para todos los casos de cada localidad:

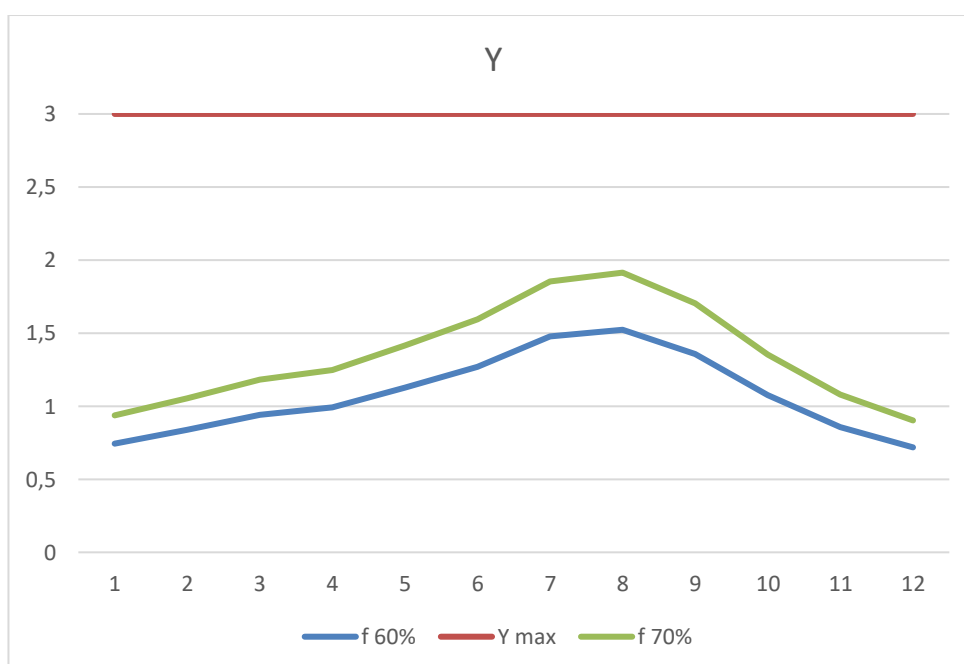


Imagen 76 Coeficientes de ganancias

Se observa que el coeficiente de ganancias no llega al máximo impuesto de 3, y que cuanto mayor es la demanda porcentual mayor es su valor. Además, sigue la misma tendencia y forma que la representación de la fracción mensual. Al igual que ocurre con la fracción mensual, los coeficientes de pérdidas y ganancias para los casos óptimos son iguales para todos los casos dentro de una misma localidad y una misma fracción anual.

En la siguiente imagen se representa los coeficientes de pérdidas obtenidos para los valores de cobertura anual de la demanda de 60 % y 70 %. Como queda representado, las pérdidas serán mayores para los meses de verano, y menores para los primeros y últimos meses del año correspondientes al invierno.

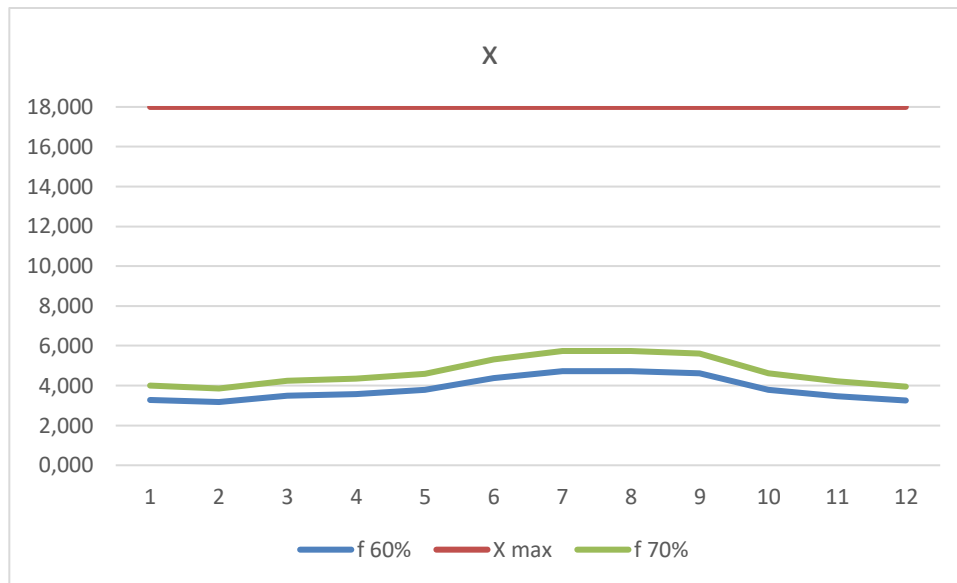


Imagen 77 Coeficientes de pérdidas

4.7. Función global para Sevilla

En los anteriores apartados se han obtenido unas ecuaciones para cada caso, es decir, para cada uso que se le quiera dar al edificio. En este apartado se pretende, a partir de todos los resultados obtenidos de las optimizaciones de los distintos casos, obtener una función que dependa de la fracción de cobertura anual de demanda de agua caliente y de la demanda anual en términos energéticos. Esta ecuación pretende cubrir todos los casos posibles de instalaciones de agua caliente recogidos en Sevilla.

Se ha recurrido, al igual que en los casos anteriores, al *EES* para la obtención de dicha función polinómica. En primer lugar, se ha recurrido a una función polinómica de segundo grado sin términos cruzados, con la que se obtenía una fiabilidad del 99 %, por lo que se ha intentado con una función de segundo grado con términos cruzados y se ha obtenido una fiabilidad del 100 %, tal y como se representa en la siguiente gráfica facilitada por *EES*.

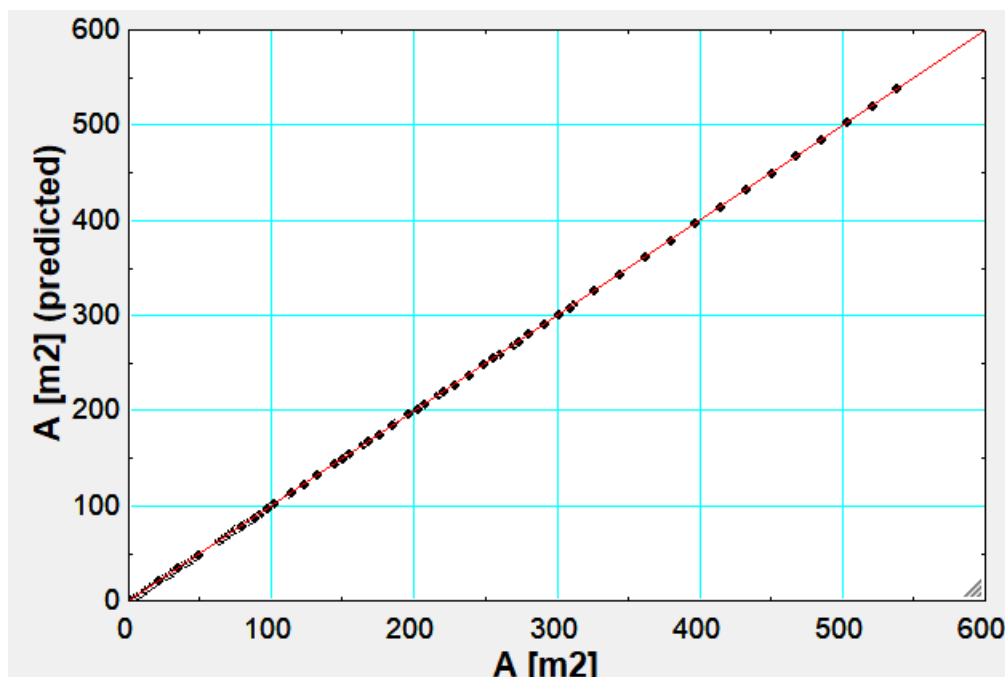


Imagen 78 A vs A predicción. 100 %

La función obtenida es la siguiente:

$$A = 1,61967175 \cdot 10^{01} - 5,01326723 \cdot 10^{01} f_{\text{anual}} + 3,85635780 \cdot 10^{01} f_{\text{anual}}^2 \\ - 1,20038310 \cdot 10^{-10} L_{\text{anual}} + 1,50158931 \cdot 10^{-31} L_{\text{anual}}^2 \\ + 5,70898200 \cdot 10^{-10} f_{\text{anual}} L_{\text{anual}}$$

Al igual que ha sucedido con la función del área, la función relativa al volumen de acumulación alcanza el 100% de fiabilidad con una función polinómica de segundo grado con términos cruzados, tal y como se representa en la siguiente imagen:

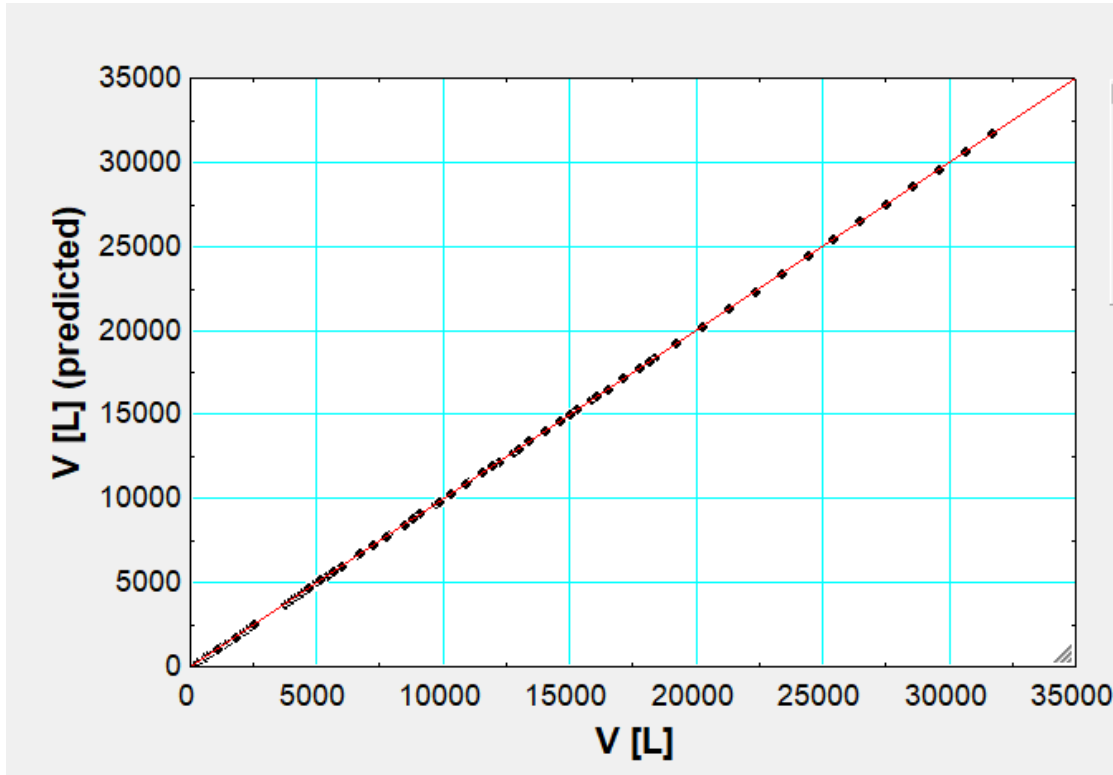


Imagen 79 V vs V predicción. 100 %

La ecuación que se ha obtenido es la siguiente:

$$V = 1,29771344 \cdot 10^{03} - 4,01674130 \cdot 10^{03} f_{\text{anual}} + 3,08980704 \cdot 10^{03} f_{\text{anual}}^2 \\ - 1,88122973 \cdot 10^{-08} L_{\text{anual}} - 5,63098863 \cdot 10^{-29} L_{\text{anual}}^2 + 5,03946510 \cdot 10^{-08} f_{\text{anual}} L_{\text{anual}}$$

Con estas dos ecuaciones se va a calcular las áreas y volúmenes para una serie de ejemplos para la ciudad de Sevilla. Se va a calcular la optimización con el programa y posteriormente se va a calcular con las fórmulas para comprobar que no difieren los resultados y que la función se adapta correctamente.

4.7.1. Ejemplos

Restaurante

En primer lugar, se va a calcular con las funciones extraídas del *EES* y posteriormente se van a introducir los datos de partida en el código y se optimizará la función objetivo económica para el menor coste posible.

Se ha elegido un restaurante pequeño, donde se sirve a 50 comensales diarios. Se establece que según el código técnico HE4 el consumo de agua caliente será de 8 litros diarios por persona y día. Por lo que, con estos datos, junto con los datos climatológicos, respectivos a las temperaturas y a la radiación, se puede calcular la demanda anual en términos energéticos:

$$L_{ACS} = M_{ac} \rho C_p (T_{ac} - T_{af}) N$$

Donde se conocen todos los términos:

Características del agua: ρ, C_p

Número de días de cada mes: N

Temperatura del agua fría de red en el Anexo A: T_{af}

Temperatura del agua caliente: $T_{ac} = 45^\circ\text{C}$

Demanda de caudal de litros diario de agua caliente: $M_{ac} = 50 \text{ persona} \cdot 8 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 400 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$

Con las características propia de cada mes se obtienen los resultados de la siguiente tabla:

Enero	$1,76 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Febrero	$1,76 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Marzo	$1,66 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Abril	$1,60 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Mayo	$1,50 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Junio	$1,35 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Julio	$1,24 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Agosto	$1,24 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Septiembre	$1,29 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Octubre	$1,50 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Noviembre	$1,66 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Diciembre	$1,76 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$

$L_{\text{anual}} = 1,83 \cdot 10^{10} \text{ J/año}$

Tabla 24 Demanda energética en restaurante

Puesto que la ecuación que se ha obtenido en el *EES* para obtener los valores óptimos económicos de área y volumen dependen de la demanda anual energética, ya calculada, y de la fracción de cobertura de la demanda anual se va a calcular la fracción que exigen el reglamento mínima, sabiendo que se encuentra en zona V y la demanda de litros de agua caliente diaria ($400 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$):

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (l/d) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA
50 - 5000	V
5000 – 10000	60
10000	70

Tabla 25 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V

Con los datos de demanda en términos energéticos anual y de fracción anual se obtiene, según las funciones extraídas:

$$A(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 4,074 \text{ m}^2$$

$$V(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 209,182 \text{ L}$$

Puesto que también se obtuvo del *EES* la función de la que se obtenía el valor de la relación V/A se va a comprobar lo que se obtiene mediante esta función y mediante la optimización completa con el código:

$$V/A (L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 51,1$$

Se va a ejecutar el código y a analizar los resultados obtenidos por ambos métodos:

RESULTADOS DEL CÓDIGO	RESULTADOS DE FÓRMULAS	DESVIACIÓN
$A = 4,074 \text{ m}^2$	$A = 4,074 \text{ m}^2$	$\Delta_A = 0 \text{ m}^2$
$V = 209,2 \text{ L}$	$V = 209,182 \text{ L}$	$\Delta_V = 0,018 \text{ L}$
$V/A = 51,35$	$V/A = 51,1$	$\Delta_{V/A} = 0,25$

Tabla 26 Resultados y comparaciones. Restaurante

La diferencia entre los resultados de área y volumen es prácticamente nula, por lo que se concluye que existe un buen ajuste en las fórmulas. En la fórmula obtenida de la relación V/A sin embargo tiene un poco de desviación, pues al calcular la relación con los resultados obtenidos por los polinomios se obtiene $V/A = 51,35$, igual que lo obtenido por la ejecución del código.

Se da por válidos los resultados de los polinomios, pero no se puede encontrar en el mercado un área y un volumen de esos valores, por lo que se va a comprobar que valores más próximos son más adecuados para cumplir con la fracción mínima que debe cumplir según el reglamento y que sea más económico:

$A [\text{m}^2]$	$V [\text{L}]$	V/A	$FO [\text{€}]$	$f_{\text{anual}} [\%]$
4	239,9	59,97	2088	60
-	200	<50	-	-
4	250	62,5	2100	60,19
5	200	<50	-	-

Tabla 27 Prueba de resultados. Restaurantes

Se va a comentar cada fila de la tabla, y la causa de las comprobaciones. En primer lugar, se ha comprobado con un área de 4 m^2 si podría obtenerse la fracción anual mínima exigida, se comprueba que cumpliría, pero no con un volumen menor de 239,9 L, igualmente se comprueba con un depósito de 200 L para dicha fracción mínima anual, pero la relación obtenida de V/A es menor de la exigida por el reglamento de 50. Se ha probado estos valores de números enteros de volumen y área puesto que se encontrarían en el mercado.

Se procede a la comprobación del siguiente valor que se puede encontrar en el mercado a 239,9 L, que sería 250 L, y el valor comprobado en la primera fila de 4 m^2 , con estos se cumple las imposiciones del reglamento de fracción anual y de la relación V/A . Finalmente se comprueba 5 m^2 y 200 L, sin embargo, queda por debajo de $50 < V/A$ que exige el reglamento, por lo que se desecha esa posibilidad, y se establece como resultado final para el restaurante:

$A [\text{m}^2]$	$V [\text{L}]$	V/A	$FO [\text{€}]$	$f_{\text{anual}} [\%]$
4	250	62,5	2100	60,19

Tabla 28 Resultados. Restaurante

Camping

Se va a proceder como en el caso anterior. Se va a calcular con las funciones extraídas del *EES* y posteriormente se comprobará con el código.

Se ha elegido un camping, donde se alojan 75 personas diarias. Se establece que según el código técnico HE4 el consumo de agua caliente será de 21 litros diarios por persona y día. Por lo que, con estos datos, junto con los datos climatológicos, respectivos a las temperaturas y a la radiación, se puede calcular la demanda anual en términos energéticos:

$$L_{ACS} = M_{ac} \rho C_p (T_{ac} - T_{af}) N$$

Donde se conocen todos los términos, como se ha explicado en el caso anterior. Por tanto, se va a calcular tan sólo la demanda de caudal de litros diario de agua caliente: $M_{ac} = 75 \text{ persona} \cdot 21 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 1575 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$

Con las características propia de cada mes se obtienen los resultados de la siguiente tabla:

Enero	$6,92 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Febrero	$6,92 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Marzo	$6,52 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Abril	$6,31 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Mayo	$5,91 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Junio	$5,30 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Julio	$4,89 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Agosto	$4,89 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Septiembre	$5,09 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Octubre	$5,91 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Noviembre	$6,52 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Diciembre	$6,92 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$

$L_{anual} = 7,21 \cdot 10^{10} \text{ J/año}$

Tabla 29 Demanda energética en camping

Puesto que la ecuación que se ha obtenido en el *EES* para obtener los valores óptimos económicos de área y volumen dependen de la demanda anual energética, ya calculada, y de la fracción de cobertura de la demanda anual se va a calcular la fracción que exigen el reglamento mínima, sabiendo que se encuentra en zona V y la demanda de litros de agua caliente diaria ($1575 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$):

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (l/d) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA
50 - 5000	V
5000 - 10000	60
10000	70

Tabla 30 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V

Con los datos de demanda en términos energéticos anual y de fracción anual se obtiene, según las funciones extraídas:

$$A(L_{anual}, f_{anual}) = 16,04 \text{ m}^2$$

$$V(L_{anual}, f_{anual}) = 823,59 \text{ L}$$

Puesto que también se obtuvo del *EES* la función de la que se obtenía el valor de la relación V/A se va a comprobar lo que se obtiene mediante esta función y mediante la optimización completa con el código:

$$V/A (L_{anual}, f_{anual}) = 51,1$$

Se va a ejecutar el código y a analizar los resultados obtenidos por ambos métodos:

RESULTADOS DEL CÓDIGO	RESULTADOS DE FÓRMULAS	DESVIACIÓN
$A = 16,04 \text{ m}^2$	$A = 16,04 \text{ m}^2$	$\Delta_A = 0 \text{ m}^2$
$V = 823,5 \text{ L}$	$V = 823,59 \text{ L}$	$\Delta_V = 0,09 \text{ L}$
$V/A = 51,35$	$V/A = 51,1$	$\Delta_{V/A} = 0,25$

Tabla 31 Resultados y comparaciones. Camping

La diferencia entre los resultados de área y volumen es prácticamente nula, por lo que se concluye que existe un buen ajuste en las fórmulas. En la fórmula obtenida de la relación V/A sin embargo tiene un poco de desviación, pues al calcular la relación con los resultados obtenidos por los polinomios se obtiene $V/A = 51,35$, igual que lo obtenido por la ejecución del código.

Se da por válidos los resultados de los polinomios, pero no se puede encontrar en el mercado un área y un volumen de esos valores, por lo que se va a comprobar que valores más próximos son más adecuados para cumplir con la fracción mínima que debe cumplir según el reglamento y que sea más económico:

$A [\text{m}^2]$	$V [\text{L}]$	V/A	$FO [\text{€}]$	$f_{\text{anual}} [\%]$
16	838,7	52,42	8206	60
15,97	850	53,22	8207	60
16	850	53,13	8220	60,06

Tabla 32 Prueba de resultados. Camping

Se va a comentar cada fila de la tabla, y la causa de las comprobaciones. En primer lugar, se ha comprobado con un área de 16 m^2 si podría obtenerse la fracción anual mínima exigida, se comprueba que cumpliría, pero no con un volumen menor de $838,7 \text{ L}$, igualmente se comprueba con un depósito de 850 L para dicha fracción mínima anual, cumpliría la fracción mínima anual y la relación V/A . Se obtendría un área de casi 16 m^2 , por lo que se toma como resultado final un área de 16 m^2 y un volumen de 850 L , con los que se obtendrían los siguientes resultados:

$A [\text{m}^2]$	$V [\text{L}]$	V/A	$FO [\text{€}]$	$f_{\text{anual}} [\%]$
16	850	53,13	8220	60,06

Tabla 33 Resultados. Camping

Fábrica

Se va a seguir los pasos de los casos anteriores. Se va a calcular con las funciones extraídas del *EES* y posteriormente se comprobará con el código.

Se ha elegido una fábrica, donde trabajan 50 personas diarias. Se establece que según el código técnico HE4 el consumo de agua caliente será de 21 litros diarios por persona y día. Por lo que, con estos datos, junto con los datos climatológicos, respectivos a las temperaturas y a la radiación, se puede calcular la demanda anual en términos energéticos:

$$L_{ACS} = M_{ac} \rho C_p (T_{ac} - T_{af}) N$$

Donde se conocen todos los términos, como se ha explicado en el caso anterior. Por tanto, se va a calcular tan sólo la demanda de caudal de litros diario de agua caliente: $M_{ac} = 50 \text{ persona} \cdot 21 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 1050 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$

Con las características propia de cada mes se obtienen los resultados de la siguiente tabla:

Enero	$4,62 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Febrero	$4,62 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Marzo	$4,34 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Abril	$4,21 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Mayo	$3,94 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Junio	$3,53 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Julio	$3,26 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Agosto	$3,26 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Septiembre	$3,39 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Octubre	$3,94 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Noviembre	$4,34 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$
Diciembre	$4,62 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$

$L_{\text{anual}} = 4,81 \cdot 10^{10} \text{ J/año}$

Tabla 34 Demanda energética en fábrica

Puesto que la ecuación que se ha obtenido en el *EES* para obtener los valores óptimos económicos de área y volumen dependen de la demanda anual energética, ya calculada, y de la fracción de cobertura de la demanda anual se va a calcular la fracción que exigen el reglamento mínima, sabiendo que se encuentra en zona V y la demanda de litros de agua caliente diaria ($1050 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$):

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (l/d) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA
50 - 5000	V
5000 - 10000	60
10000	70

Tabla 35 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V

Con los datos de demanda en términos energéticos anual y de fracción anual se obtiene, según las funciones extraídas:

$$A(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 10,69 \text{ m}^2$$

$$V(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 549,06 \text{ L}$$

Puesto que también se obtuvo del *EES* la función de la que se obtenía el valor de la relación V/A se va a comprobar lo que se obtiene mediante esta función y mediante la optimización completa con el código:

$$V/A(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 51,1$$

Se va a ejecutar el código y a analizar los resultados obtenidos por ambos métodos:

RESULTADOS DEL CÓDIGO	RESULTADOS DE FÓRMULAS	DESVIACIÓN
$A = 10,69 \text{ m}^2$	$A = 10,69 \text{ m}^2$	$\Delta_A = 0 \text{ m}^2$
$V = 549,06 \text{ L}$	$V = 549,06 \text{ L}$	$\Delta_V = 0 \text{ L}$
$V/A = 51,35$	$V/A = 51,1$	$\Delta_{V/A} = 0,25$

Tabla 36 Resultados y comparaciones. Fábrica

La diferencia entre los resultados de área y volumen es prácticamente nula, por lo que se concluye que existe un buen ajuste en las fórmulas. En lo respectivo a la relación V/A ocurre lo mismo que en los casos anteriores.

Se da por válidos los resultados de los polinomios, pero no se puede encontrar en el mercado un área y un volumen de esos valores, por lo que se va a comprobar que valores más próximos son más adecuados para cumplir con la fracción mínima que debe cumplir según el reglamento y que sea más económico:

$A [m^2]$	$V [L]$	V/A	$FO [€]$	$f_{anual} [\%]$
10	950,7	95,07	5641	60
10,69	550	51,45	5471	60
10	550	55	5160	57,64
11	550	50	5610	61,01

Tabla 37 Prueba de resultados. Fábrica

Se va a comentar cada fila de la tabla, y la causa de las comprobaciones. En primer lugar, se ha comprobado con un área de $10 m^2$ si podría obtenerse la fracción anual mínima exigida, se comprueba que cumpliría, pero no con un volumen menor de 950,7 L, un volumen mucho más elevado que el resultado de la optimización, casi el doble, por lo que se desecha esa opción.

Se comprueba con un depósito de 550 L para una fracción mínima anual de 60%, cumpliría la fracción mínima anual y la relación V/A , pero se tendía que instalar un área de $10,69 m^2$, un número que no se encuentra en el mercado. Se plantea un área de $11 m^2$ y un volumen de 550 L, con la que se obtiene una fracción de cobertura anual de 61,01 %, además se obtendrían los siguientes resultados:

$A [m^2]$	$V [L]$	V/A	$FO [€]$	$f_{anual} [\%]$
11	550	50	5610	61,01

Tabla 38 Resultados. Fábrica

Cuartel

Se siguen los mismos pasos que los anteriores casos. Se va a calcular con las funciones extraídas del *EES* y posteriormente se comprobará con el código.

Se ha elegido un cuartel, donde trabajan 35 personas diarias. Se establece que según el código técnico HE4 el consumo de agua caliente será de 28 litros diarios por persona y día. Por lo que, con estos datos, junto con los datos climatológicos, respectivos a las temperaturas y a la radiación, se puede calcular la demanda anual en términos energéticos:

$$L_{ACS} = M_{ac} \rho C_p (T_{ac} - T_{af}) N$$

Donde se conocen todos los términos, como se ha explicado en el caso anterior. Por tanto, se va a calcular tan sólo la demanda de caudal de litros diario de agua caliente: $M_{ac} = 35 \text{ persona} \cdot 28 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 980 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$

Con las características propia de cada mes se obtienen los resultados de la siguiente tabla:

Enero	$4,31 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	$L_{\text{anual}} = 4,49 \cdot 10^{10} \text{ J/año}$
Febrero	$4,31 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Marzo	$4,06 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Abril	$3,93 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Mayo	$3,68 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Junio	$3,29 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Julio	$3,04 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Agosto	$3,04 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Septiembre	$3,17 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Octubre	$3,68 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Noviembre	$4,06 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Diciembre	$4,31 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	

Tabla 39 Demanda energética en cuartel

Puesto que la ecuación que se ha obtenido en el *EES* para obtener los valores óptimos económicos de área y volumen dependen de la demanda anual energética, ya calculada, y de la fracción de cobertura de la demanda anual se va a calcular la fracción que exigen el reglamento mínima, sabiendo que se encuentra en zona V y la demanda de litros de agua caliente diaria ($980 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$):

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (l/d) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA
50 - 5000	V
5000 – 10000	60
10000	70

Tabla 40 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V

Con los datos de demanda en términos energéticos anual y de fracción anual se obtiene, según las funciones extraídas:

$$A(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 9,98 \text{ m}^2$$

$$V(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 512,39 \text{ L}$$

Puesto que también se obtuvo del *EES* la función de la que se obtenía el valor de la relación V/A se va a comprobar lo que se obtiene mediante esta función y mediante la optimización completa con el código:

$$V/A (L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 51,1$$

Se va a ejecutar el código y a analizar los resultados obtenidos por ambos métodos:

RESULTADOS DEL CÓDIGO	RESULTADOS DE FÓRMULAS	DESVIACIÓN
$A = 9,98 \text{ m}^2$	$A = 9,98 \text{ m}^2$	$\Delta_A = 0 \text{ m}^2$
$V = 512,4 \text{ L}$	$V = 512,4 \text{ L}$	$\Delta_V = 0 \text{ L}$
$V/A = 51,35$	$V/A = 51,1$	$\Delta_{V/A} = 0,25$

Tabla 41 Resultados y comparaciones. Cuartel

La diferencia entre los resultados de área y volumen es prácticamente nula, por lo que se concluye que existe un buen ajuste en las fórmulas. En lo respectivo a la relación V/A ocurre lo mismo que en los casos anteriores.

Se da por válidos los resultados de los polinomios, pero no se puede encontrar en el mercado un área y un volumen de esos valores, por lo que se va a comprobar que valores más próximos son más adecuados para cumplir con la fracción mínima que debe cumplir según el reglamento y que sea más económico:

$A [m^2]$	$V [L]$	V/A	$FO [€]$	$f_{anual} [\%]$
10	505,1	50,51	5106	60
-	500	<50	-	-
9,886	550	55,64	5108	60
10	500	50	5100	59,95
10	550	55	5160	60,41

Tabla 42 Prueba de resultados. Cuartel

Se va a comentar cada fila de la tabla, y la causa de las comprobaciones. En primer lugar, se ha comprobado con un área de 10 m², se comprueba que cumpliría, pero no con un volumen menor de 505 L.

En la segunda fila se comprueba cuánta área requiere si se impone un volumen de 500 L, pero no cumple con la condición de la relación de V/A mayor o igual a 50, por lo que se desecha esa opción.

Se comprueba cuánto quedaría la fracción anual si se impone un área de 10 m² y un volumen de 500 L, y queda 59,95 % de cobertura anual, no llega al mínimo exigido por el reglamento, pero se plantea darlo por válido. Finalmente, se plantea la opción de la instalación de un depósito de acumulación de 550 L y un área de 10 m² y se obtienen unos resultados que cumplirían con todas las exigencias del código técnico.

Puesto que la penúltima opción quedaba muy cerca del porcentaje impuesto por el reglamento de plantean como válidos los siguientes resultados:

$A [m^2]$	$V [L]$	V/A	$FO [€]$	$f_{anual} [\%]$
10	500	50	5100	59,95
10	550	55	5160	60,41

Tabla 43 Resultados. Cuartel

Hospital

Se siguen los mismos pasos que los anteriores casos. Se va a calcular con las funciones extraídas del *EES* y posteriormente se comprobará con el código.

Se ha elegido un cuartel, donde hay hospitalizadas 150 personas diarias. Se establece que según el código técnico HE4 el consumo de agua caliente será de 55 litros diarios por persona y día. Por lo que, con estos datos, junto con los datos climatológicos, respectivos a las temperaturas y a la radiación, se puede calcular la demanda anual en términos energéticos:

$$L_{ACS} = M_{ac} \rho C_p (T_{ac} - T_{af}) N$$

Donde se conocen todos los términos, como se ha explicado en el caso anterior. Por tanto, se va a calcular tan sólo la demanda de caudal de litros diario de agua caliente:

$$M_{ac} = 150 \text{ persona} \cdot 55 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 8250 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$$

Con las características propia de cada mes se obtienen los resultados de la siguiente tabla:

Enero	$3,63 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	$L_{\text{anual}} = 3,78 \cdot 10^{11} \text{ J/año}$
Febrero	$3,63 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Marzo	$3,41 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Abril	$3,31 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Mayo	$3,09 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Junio	$2,77 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Julio	$2,56 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Agosto	$2,56 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Septiembre	$2,67 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Octubre	$3,09 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Noviembre	$3,41 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	
Diciembre	$3,63 \cdot 10^{10} \text{ J/mes}$	

Tabla 44 Demanda energética en hospital

Puesto que la ecuación que se ha obtenido en el *EES* para obtener los valores óptimos económicos de área y volumen dependen de la demanda anual energética, ya calculada, y de la fracción de cobertura de la demanda anual se va a calcular la fracción que exigen el reglamento mínima, sabiendo que se encuentra en zona V y la demanda de litros de agua caliente diaria ($980 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$):

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (l/d) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA
50 - 5000	V
5000 – 10000	60
10000	70

Tabla 45 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V

Con los datos de demanda en términos energéticos anual y de fracción anual se obtiene, según las funciones extraídas:

$$A(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 105,6 \text{ m}^2$$

$$V(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 6216,8 \text{ L}$$

Puesto que también se obtuvo del *EES* la función de la que se obtenía el valor de la relación V/A se va a comprobar lo que se obtiene mediante esta función y mediante la optimización completa con el código:

$$V/A (L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 58,9$$

Se va a ejecutar el código y a analizar los resultados obtenidos por ambos métodos:

RESULTADOS DEL CÓDIGO	RESULTADOS DE FÓRMULAS	DESVIACIÓN
$A = 105,6 \text{ m}^2$	$A = 105,6 \text{ m}^2$	$\Delta_A = 0 \text{ m}^2$
$V = 6216 \text{ L}$	$V = 6216,8 \text{ L}$	$\Delta_V = 0,8 \text{ L}$
$V/A = 58,8$	$V/A = 58,9$	$\Delta_{V/A} = 0,1$

Tabla 46 Resultados y comparaciones. Hospital

La diferencia entre los resultados de área es nula, mientras que el resultado del volumen difiere en 0,8 L, una diferencia muy baja, por lo que se concluye que existe un buen ajuste en las fórmulas. En lo respectivo a la relación V/A difieren en 0,1, una cantidad baja en comparación al propio valor de las relaciones.

Se da por válidos los resultados de los polinomios, pero no se puede encontrar en el mercado un área y un volumen de esos valores, por lo que se va a comprobar que valores más próximos son más adecuados para cumplir con la fracción mínima que debe cumplir según el reglamento y que sea más económico:

$A [m^2]$	$V [L]$	V/A	$FO [€]$	$f_{anual} [\%]$
100	9064	90,64	55877	70
106	6000	56,51	54977	70

Tabla 47 Prueba de resultados. Hospital

Se va a comentar cada fila de la tabla, y la causa de las comprobaciones. En primer lugar, se ha comprobado con un área de 100 m², se comprueba que cumpliría, pero no con un volumen menor de 9064 L. Un volumen más elevado del que se obtiene de la optimización económica.

En la segunda fila se comprueba cuánta área requiere si se impone un volumen de 6000 L, se obtiene un área de 106 m². Puesto que cumple con el requisito de fracción anual de 70% y la relación V/A es mayor de 50 se da por válida esta opción:

$A [m^2]$	$V [L]$	V/A	$FO [€]$	$f_{anual} [\%]$
106	6000	56,51	54977	70

Tabla 48 Resultados. Hospital

Vivienda

Se siguen los mismos pasos que los anteriores casos. Se va a calcular con las funciones extraídas del *EES* y posteriormente se comprobará con el código.

Se ha elegido un edificio multifamiliar, donde residen 80 personas. Se establece que según el código técnico HE4 el consumo de agua caliente será de 28 litros diarios por persona y día, sin embargo, a diferencia de los otros casos hay que aplicar el factor de centralización, en este caso de 0,90, ya que se supone unos apartamentos de 3 habitaciones, por tanto, residen 4 personas en cada vivienda, lo que supone 20 viviendas.

Número de viviendas	$N \leq 3$	$4 \leq N \leq 10$	$11 \leq N \leq 20$	$21 \leq N \leq 50$	$51 \leq N \leq 75$	$76 \leq N \leq 100$	$N \geq 101$
Factor de centralización	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70

Tabla 49 Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado

Por lo que, con estos datos, junto con los datos climatológicos, respectivos a las temperaturas y a la radiación, se puede calcular la demanda anual en términos energéticos:

$$L_{ACS} = M_{ac} \rho C_p (T_{ac} - T_{af}) N$$

Donde se conocen todos los términos, como se ha explicado en el caso anterior. Por tanto, se va a calcular tan sólo la demanda de caudal de litros diario de agua caliente:

$$M_{ac} = 80 \text{ persona} \cdot 28 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} \cdot 0,9 = 2016 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$$

Con las características propia de cada mes se obtienen los resultados de la siguiente tabla:

Enero	$8,86 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	$L_{\text{anual}} = 9,23 \cdot 10^{10} \text{ J/año}$
Febrero	$8,86 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Marzo	$8,34 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Abril	$8,08 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Mayo	$7,56 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Junio	$6,78 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Julio	$6,26 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Agosto	$6,26 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Septiembre	$6,52 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Octubre	$7,56 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Noviembre	$8,34 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	
Diciembre	$8,86 \cdot 10^9 \text{ J/mes}$	

Tabla 50 Demanda energética en vivienda

Puesto que la ecuación que se ha obtenido en el *EES* para obtener los valores óptimos económicos de área y volumen dependen de la demanda anual energética, ya calculada, y de la fracción de cobertura de la demanda anual se va a calcular la fracción que exigen el reglamento mínima, sabiendo que se encuentra en zona V y la demanda de litros de agua caliente diaria (2016 $\frac{\text{litros}}{\text{día}}$):

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (l/d) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA
50 - 5000	V
5000 - 10000	60
10000	70

Tabla 51 Contribución solar mínima (%) para ACS, zona V

Con los datos de demanda en términos energéticos anual y de fracción anual se obtiene, según las funciones extraídas:

$$A(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 20,53 \text{ m}^2$$

$$V(L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 1054,14 \text{ L}$$

Puesto que también se obtuvo del *EES* la función de la que se obtenía el valor de la relación V/A se va a comprobar lo que se obtiene mediante esta función y mediante la optimización completa con el código:

$$V/A (L_{\text{anual}}, f_{\text{anual}}) = 51,1$$

Se va a ejecutar el código y a analizar los resultados obtenidos por ambos métodos:

RESULTADOS DEL CÓDIGO	RESULTADOS DE FÓRMULAS	DESVIACIÓN
$A = 20,53 \text{ m}^2$	$A = 20,53 \text{ m}^2$	$\Delta_A = 0 \text{ m}^2$
$V = 1054,1 \text{ L}$	$V = 1054,1 \text{ L}$	$\Delta_V = 0 \text{ L}$
$V/A = 51,34$	$V/A = 51,1$	$\Delta_{V/A} = 0,24$

Tabla 52 Resultados y comparaciones. Vivienda

La diferencia entre los resultados de área es nula, al igual que en el caso del volumen, por lo que se concluye que existe un buen ajuste en las fórmulas. En lo respectivo a la relación V/A difieren en 0,24, una cantidad baja

en comparación al propio valor de las relaciones.

Se da por válidos los resultados de los polinomios, pero no se puede encontrar en el mercado un área y un volumen de esos valores, por lo que se va a comprobar que valores más próximos son más adecuados para cumplir con la fracción mínima que debe cumplir según el reglamento y que sea más económico:

$A [m^2]$	$V [L]$	V/A	$FO [€]$	$f_{anual} [\%]$
20	1287	64,36	10545	60
-	1000	<50	-	60
20,41	1100	53,89	10506	60
20	1100	55	10320	59,27
20	1200	60	10440	59,68
20	1300	65	10560	60,05
21	1100	52,38	10770	61,01

Tabla 53 Prueba de resultados. Vivienda

Se va a comentar cada fila de la tabla, y la causa de las comprobaciones. En primer lugar, se ha comprobado con un área de 20 m², es decir, se ha redondeado el resultado que se ha obtenido de la optimización, y se comprueba que cumpliría, pero no con un volumen menor de 1287 L.

En la segunda fila se comprueba cuánta área requiere si se impone un volumen de 1000 L, sin embargo, la relación V/A es menor de 50, por lo que se desecha esta opción, por lo que se eleva el volumen al siguiente número entero, 1100L. Con este valor cumple el porcentaje mínimo y la relación V/A. Se comprueba que con 20 m² y 1100 L no se cumple la fracción mínima que debe de cubrir, por lo que se aumenta una unidad el valor del área a 21 m², consiguiendo que cumpla las especificaciones del código técnico, pero se observa que si se aumenta el volumen de acumulación a 1300 L dejando el área en 20 m² se obtiene un coste menor, por lo que se da como solución final:

$A [m^2]$	$V [L]$	V/A	$FO [€]$	$f_{anual} [\%]$
20	1300	65	10560	60,05

Tabla 54 Resultados. Vivienda

4.8. Función global para Andalucía

Se ha calculado una ecuación válida para toda la provincia de Sevilla, lo que implica una misma radiación anual en todos los casos estudiados. En este apartado se proponer extender dicha ecuación a toda la comunidad autónoma de Andalucía. Para ello se va a proceder de la misma forma que en apartado anterior. Se va a optimizar una serie de casos y apartir de éstos se extrae un polinomio que se ajuste a los resultados obtenidos, y esta función polinómica dependerá, al igual que en el caso anterior, del consumo energético anual y de la fracción anual. Además, se le añadirá el término de la radiación anual, pues a diferencia del apartado anterior, al tratarse de varias provincias cada una tendrá unas condiciones de radiación, por lo que para obtener el área y el volumen habrá que evaluar las funciones con la radiación característica de la zona y con la demanda y fracción anual a cubrir propias del caso:

$$A = A(L_{anual}, f_{anual}, H_{anual})$$

$$V = V(L_{anual}, f_{anual}, H_{anual})$$

Puesto que se va a mantener la misma función objetivo económica, con unos términos extraídos del precio medio de unos productos, tal y como se comentó en apartados anteriores, no se van a cambiar las características del captador.

Se han usado los datos climáticos añadidos en el Anexo C para cada una de las provincias andaluzas. Se recoge la temperatura ambiente, la temperatura de la red de agua fría y la radiación que incide en estas provincias. A raíz de la radiación anual se clasifica en zona a la que pertenece cada provincia, pudiendo ser en zona IV o V en la comunidad andaluza, pues es una de las zonas con mayores radiaciones de España. Los resultados de las optimizaciones en los que se ha basado el EES se encuentran en el Anexo D.

A diferencia de lo que ocurría en el caso de la provincia de Sevilla, al incluir el término de la radiación anual aparecen cuatro términos más, por lo que es notablemente de mayor extensión que las anteriores funciones. En el caso de la función polinómica del área para tener una alta fiabilidad, de un 99,98 % se consigue con una función de segundo grado con términos cruzados:

$$\begin{aligned} A = & -6,28069842 \cdot 10^{02} + 5,89517764 \cdot 10^{01} H_{anual} - 1,22412776 \cdot 10^{00} H_{anual}^2 \\ & + 4,03191608 \cdot 10^{02} f_{anual} + 7,86730131 \cdot 10^{01} f_{anual}^2 + 2,92620356 \cdot 10^{-10} L_{anual} \\ & + 1,79130107 \cdot 10^{-24} L_{anual}^2 - 2,85081309 \cdot 10^{01} H_{anual} f_{anual} - 2,24659588 \cdot 10^{-11} H_{anual} L_{anual} \\ & + 5,46914375 \cdot 10^{-10} f_{anual} L_{anual} \end{aligned}$$

Se extrae del software EES la función polinómica de la que se obtendrían todos los valores de áreas referentes a instalaciones en la comunidad andaluza. En la siguiente imagen se comprueba el alto grado de fiabilidad que presenta dicha función, no obstante, se va a realizar un ejemplo de cada provincia para comprobar que se obtienen los mismos resultados o, al menos, próximos a los obtenidos con la optimización individual de cada caso. La función se aproxima mejor para menores valores de área:

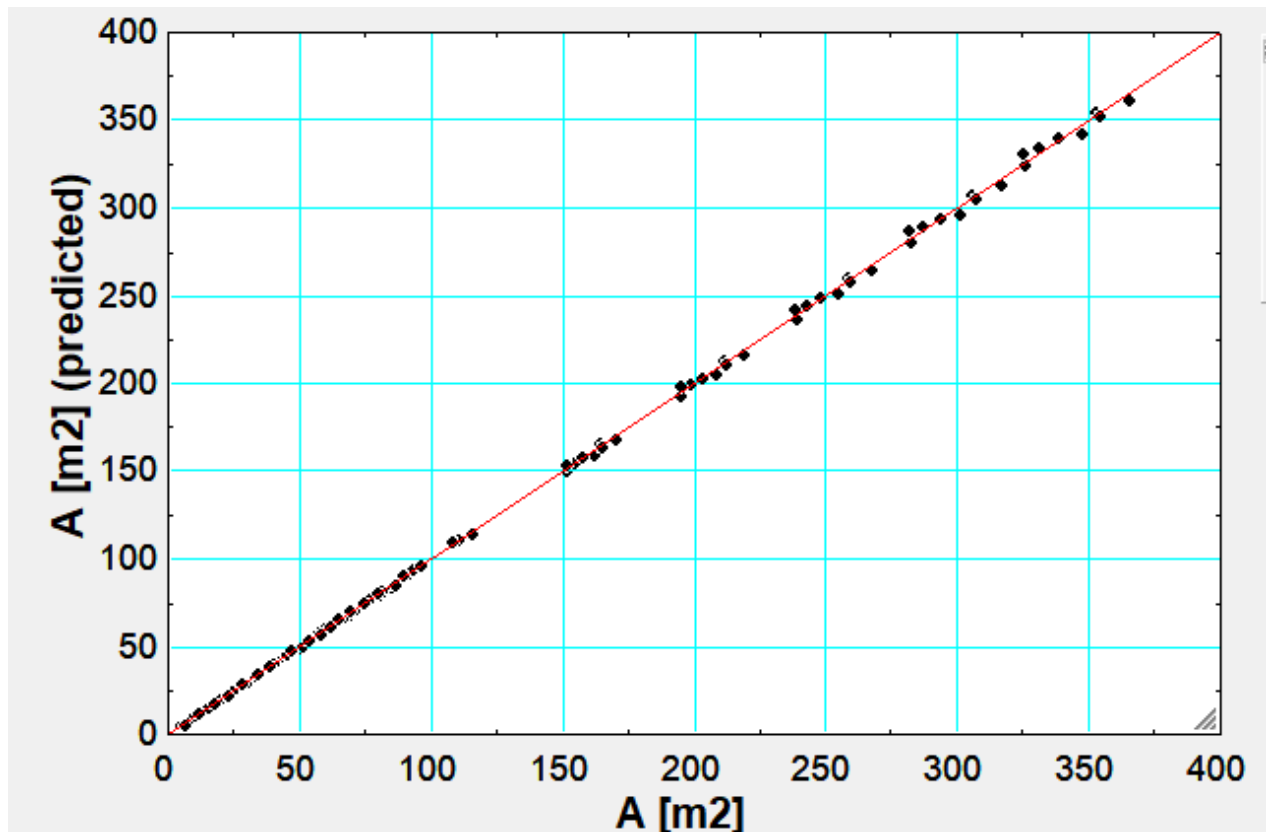


Imagen 80 Area real vs predicción. Andalucía. 99,98 %

De igual forma se ha procedido para obtener la función polinómica referente al volumen, sin embargo, mientras

que para la función polinómica del área bastó con un polinomio de segundo grado con términos cruzados para obtener una fiabilidad elevada, en el caso del volumen para alcanzar una fiabilidad del 99,92% es necesaria un polinomio de tercer grado con términos cruzados, lo que conlleva una función de veintidós términos, y de la misma forma que se procederá con el área, también se comprobará que los resultados son próximos a los que se obtendrían si se ejecutara una optimización en el código del *EES*.

Se obtiene la siguiente función para el volumen:

$$\begin{aligned}
 V = & -4,54870518 \cdot 10^{07} + 6,58705115 \cdot 10^{06} H_{\text{anual}} - 3,90744969 \cdot 10^{05} H_{\text{anual}}^2 \\
 & + 7,70113581 \cdot 10^{03} H_{\text{anual}}^3 + 3,01504027 \cdot 10^{07} f_{\text{anual}} - 6,34007337 \cdot 10^{07} f_{\text{anual}}^2 \\
 & + 4,09591224 \cdot 10^{07} f_{\text{anual}}^3 + 1,08818534 \cdot 10^{-06} L_{\text{anual}} - 6,93482234 \cdot 10^{-19} L_{\text{anual}}^2 \\
 & + 9,75960683 \cdot 10^{-34} L_{\text{anual}}^3 + 1,52007416 \cdot 10^{06} H_{\text{anual}} f_{\text{anual}} - 1,14276146 \cdot 10^{06} H_{\text{anual}} f_{\text{anual}}^2 \\
 & - 1,17467955 \cdot 10^{-07} H_{\text{anual}} L_{\text{anual}} + 8,11725293 \cdot 10^{-20} H_{\text{anual}} L_{\text{anual}}^2 \\
 & - 4,21522240 \cdot 10^{04} H_{\text{anual}}^2 f_{\text{anual}} + 3,15374458 \cdot 10^{04} H_{\text{anual}}^2 f_{\text{anual}}^2 \\
 & + 3,27296952 \cdot 10^{-09} H_{\text{anual}}^2 L_{\text{anual}} - 2,32712428 \cdot 10^{-21} H_{\text{anual}}^2 L_{\text{anual}}^2 \\
 & - 1,27144744 \cdot 10^{-07} f_{\text{anual}} L_{\text{anual}} - 3,20880976 \cdot 10^{-20} f_{\text{anual}} L_{\text{anual}}^2 \\
 & + 1,47235074 \cdot 10^{-07} f_{\text{anual}}^2 L_{\text{anual}} + 1,27886811 \cdot 10^{-20} f_{\text{anual}}^2 L_{\text{anual}}^2
 \end{aligned}$$

Como se puede observar en la siguiente imagen, que enfrenta los valores de volumen obtenidos en la optimización individual del *EES* y los predichos por la ecuación, cuanto mayor sean los valores más difieren entre sí. El ajuste es óptimo para valores menores de 9000 litros.

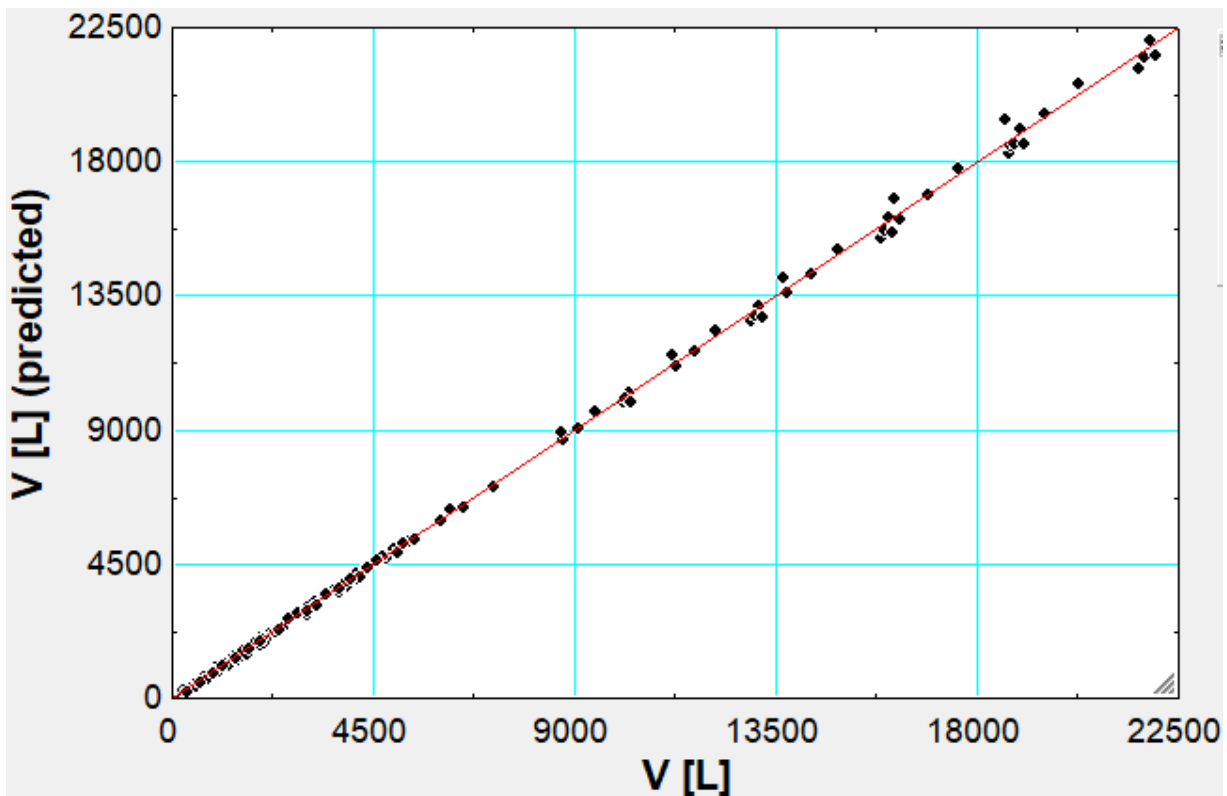


Imagen 81 Volumen real vs predicción. Andalucía. 99,92 %

Se va a comprobar el comportamiento de ambas funciones con ejemplos de las provincias de Andalucía. Se ha tomado en todos los casos una inclinación de 45° de los captadores solares, y al igual que se realizó la comprobación con Sevilla se comprueba con todas las provincias de Andalucía.

Se parte de una orientación al sur, por lo que el ángulo de acimut es nulo ($\alpha = 0$). No se producen sombras por captadores contiguos, ni por edificios próximos, por lo que se espera unas pérdidas por sombras nulas para todos los casos. Se van a calcular las pérdidas por orientación e inclinación de cada caso, sabiendo que lo máximo que puede tener es un 10% de pérdidas por orientación e inclinación:

Caso	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	10 %	10 %	15 %
Superposición de captadores	20 %	15 %	30 %
Integración	40 %	20 %	50 %

Tabla 55 Pérdidas máximas por orientación e inclinación y sombras

Las pérdidas asociadas a la inclinación se obtendrán según el CTE HE4 en función del ángulo de acimut (α), el ángulo de inclinación utilizado (β) y el ángulo de inclinación óptimo ($\beta_{\text{óptimo}}$) se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$\text{Pérdidas (\%)} = 100 \cdot \left[1,2 \cdot 10^{-4} (\beta - \beta_{\text{óptimo}})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2 \right]$$

Siendo cada término:

$$\alpha = 0^\circ \quad \beta_{\text{óptimo}} = \text{latitud} \quad \beta = 45^\circ$$

Pérdidas (%)	Provincia
0,696	Sevilla
0,861	Cádiz
0,718	Huelva
0,606	Córdoba
0,799	Almería
0,627	Jaén
0,732	Granada
0,732	Málaga

Tabla 56 Pérdidas por inclinación y orientación en cada provincia

Por lo que se cumplen las pérdidas máximas impuestas en el caso de disposición general para todas las provincias. Se da por válida la inclinación de 45° al sur.

Ejemplos

Jaén

En Jaén se ha elegido un centro penitenciario de 800 presos, lo que implica 28 litros por persona y día de agua caliente.

$$M_{ac} = 800 \text{ personas} \cdot 28 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 22\,400 \text{ litros/día}$$

Se trata de zona IV, por lo que se impone una fracción anual de contribución solar del 70 %.

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 57 Contribución solar mínima (%) para ACS

Para aplicar las funciones polinómicas extraídas es necesario conocer la fracción anual y la demanda energética anual:

$$L_{anual} = 1,06 \cdot 10^{12} \text{ J/año}$$

$$f_{anual} = 0,7$$

Se obtiene un área y un volumen:

	VOLUMEN [L]	ÁREA [m ²]
Con ecuación	18611	305
Con optimización individual	18840	307

Tabla 58 Resultados obtenidos. Jaén

Mientras que los valores de área son casi similares, los valores del volumen obtenidos difieren entre sí un 1,22 %, un bajo porcentaje. Como indicaba la Imagen 81 las mayores diferencias se encuentran a partir de los 9000 litros de volumen de acumulación. Este hecho puede deberse a que se obtuvo la función polinómica a partir de unos resultados en los que se reflejaban volúmenes de acumulación menor.

Huelva

En Huelva se ha elegido un gimnasio de 75 personas, lo que implica 21 litros por persona y día de agua caliente.

$$M_{ac} = 75 \text{ personas} \cdot 21 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 1\,575 \text{ litros/día}$$

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 59 Contribución solar mínima (%) para ACS

Se trata de zona V, por lo que se impone una fracción anual de contribución solar del 60 %. Para aplicar las funciones polinómicas extraídas es necesario conocer la fracción anual y la demanda energética anual:

$$f_{anual} = 0,6$$

$$L_{anual} = 7,19 \cdot 10^{10} \text{ J/año}$$

Se obtiene un área y un volumen:

	VOLUMEN [L]	ÁREA [m ²]
Con ecuación	991	16,48
Con optimización individual	906	16,81

Tabla 60 Resultados obtenidos. Huelva

La diferencia entre los valores del volumen puede deberse al valor que se introduce en el polinomio de demanda anual, en el que se omiten los decimales, es decir, se introducen tres cifras significativas.

Sevilla

En Sevilla se ha elegido un cuartel de 40 personas, lo que implica 28 litros por persona y día de agua caliente.

$$M_{ac} = 40 \text{ personas} \cdot 28 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 1120 \text{ litros/día}$$

Se trata de zona V, por lo que se impone una fracción anual de contribución solar del 60 %.

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 61 Contribución solar mínima (%) para ACS

Para aplicar las funciones polinómicas extraídas es necesario conocer la fracción anual y la demanda energética anual:

$$f_{anual} = 0,6$$

$$L_{anual} = 5,13 \cdot 10^{10} \text{ J/año}$$

Se obtiene un área y un volumen:

	VOLUMEN [L]	ÁREA [m ²]
Con ecuación	545	11,07
Con optimización individual	586	11,41

Tabla 62 Resultados obtenidos. Sevilla

Como se dedujo en las gráficas extraídas del EES la aproximación en valores del área es mejor que la del volumen. Y en cuanto a volumen cuanto menor es el valor mayor es la aproximación.

Almería

En Almería se ha elegido una oficina de 400 personas, lo que implica 2 litros por persona y día de agua caliente.

$$M_{ac} = 400 \text{ personas} \cdot 2 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 800 \text{ litros/día}$$

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 63 Contribución solar mínima (%) para ACS

Se trata de zona V, por lo que se impone una fracción anual de contribución solar del 60 %.

Para aplicar las funciones polinómicas extraídas es necesario conocer la fracción anual y la demanda energética anual:

$$f_{anual} = 0,6$$

$$L_{anual} = 3,64 \cdot 10^{10} \text{ J/año}$$

Se obtiene un área y un volumen:

	VOLUMEN [L]	ÁREA [m ²]
Con ecuación	364	7,67
Con optimización individual	403	8,00

Tabla 64 Resultados obtenidos. Almería

Córdoba

En Córdoba se ha elegido un albergue de 200 personas, lo que implica 24 litros por persona y día de agua caliente.

$$M_{ac} = 200 \text{ personas} \cdot 24 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 4\,800 \text{ litros/día}$$

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 - 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 65 Contribución solar mínima (%) para ACS

Se trata de zona IV, por lo que se impone una fracción anual de contribución solar del 50 %.

Para aplicar las funciones polinómicas extraídas es necesario conocer la fracción anual y la demanda energética anual:

$$f_{anual} = 0,5$$

$$L_{anual} = 2,23 \cdot 10^{11} \text{ J/año}$$

Se obtiene un área y un volumen:

	VOLUMEN [L]	ÁREA [m ²]
Con ecuación	2 112	40,28
Con optimización individual	2 018	40,37

Tabla 66 Resultados obtenidos. Córdoba

Estos valores

Cádiz

En Cádiz se ha elegido una residencia de 100 personas, lo que implica 41 litros por persona y día de agua caliente.

$$M_{ac} = 100 \text{ personas} \cdot 41 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 4\,100 \text{ litros/día}$$

Se trata de zona IV, por lo que se impone una fracción anual de contribución solar del 50 %.

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 67 Contribución solar mínima (%) para ACS

Para aplicar las funciones polinómicas extraídas es necesario conocer la fracción anual y la demanda energética anual:

$$f_{anual} = 0,5$$

$$L_{anual} = 1,88 \cdot 10^{11} J/año$$

Se obtiene un área y un volumen:

	VOLUMEN [L]	ÁREA [m ²]
Con ecuación	1577	31,89
Con optimización individual	1596	31,93

Tabla 68 Resultados obtenidos. Cádiz

Málaga

En Málaga se ha elegido un centro de salud de 70 personas, lo que implica 41 litros por persona y día de agua caliente.

$$M_{ac} = 70 \text{ personas} \cdot 41 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 2870 \text{ litros/día}$$

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 69 Contribución solar mínima (%) para ACS

Se trata de zona IV, por lo que se impone una fracción anual de contribución solar del 50 %.

Para aplicar las funciones polinómicas extraídas es necesario conocer la fracción anual y la demanda energética anual:

$$f_{anual} = 0,5$$

$$L_{anual} = 1,31 \cdot 10^{11} J/año$$

Se obtiene un área y un volumen:

	VOLUMEN [L]	ÁREA [m ²]
Con ecuación	1199	23,37
Con optimización individual	1164	23,28

Tabla 70 Resultados obtenidos. Málaga

Granada

En Granada se ha elegido un hotel 5 estrellas de 69 personas, lo que implica 100 litros por persona y día de agua caliente.

$$M_{ac} = 69 \text{ personas} \cdot 100 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 6900 \text{ litros/día}$$

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 – 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 71 Contribución solar mínima (%) para ACS

Se trata de zona IV, por lo que se impone una fracción anual de contribución solar del 60 %.

Para aplicar las funciones polinómicas extraídas es necesario conocer la fracción anual y la demanda energética anual:

$$f_{anual} = 0,6$$

$$L_{anual} = 3,40 \cdot 10^{11} \text{ J/año}$$

Se obtiene un área y un volumen:

	VOLUMEN [L]	ÁREA [m ²]
Con ecuación	3914	77,00
Con optimización individual	4043	77,42

Tabla 72 Resultados obtenidos. Granada

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado el tema de las instalaciones de agua caliente sanitaria desde una perspectiva poco habitual. Partiendo de las ecuaciones del método f-Chart, con las cuales se pueden calcular la fracción de demanda mensual, y, por consiguiente, anual de un caso definido por un área de captación, un volumen de acumulación, unas condiciones ambientales y una demanda, que dependerá del servicio del edificio y de la ocupación de éste. Con estos datos de partida se obtiene las fracciones anuales de cada instalación, sin embargo, si la fracción anual no alcanza a la mínima exigida por el reglamento se debe probar con un área de captación y un volumen de acumulación distintos, e iterar así continuamente hasta llegar a la fracción mínima definida por el código técnico. En este trabajo se recurre al software *EES* que procede de distinta forma, se definen estas ecuaciones, se fija la fracción mínima, quedando así una variable libre. No se le da valores al área y al volumen. Posteriormente, se selecciona la opción de minimización de la función objetivo que define el coste económico de la instalación en función de la relación V/A , y se obtiene como resultado un área y volumen que optimiza la función económica y cubre la fracción de demanda mínima fijada por el código técnico. En el Anexo E queda explicado más detallado el procedimiento de un caso aislado.

Se repite este procedimiento tantas veces que es posible extraer una función dependiente de distintas variables, que quedarán definidas por cada caso. Posteriormente, cuando se han obtenido las funciones, se han comparado los valores obtenidos de casos distintos por el método de optimización individual y la implementación de la función polinómica obtenida.

Los valores obtenidos por el método de optimización de la función objetivo por *EES* y los obtenidos por sustitución de las funciones obtenidas difieren en un pequeño porcentaje, esto se debe a que las funciones que se han obtenido han sido interpoladas de varios casos concretos, pero no se han simulado todos los casos posibles, sino los más representativos. Se podrían simular más casos para su posterior interpolación en función polinómica y así conseguir obtener el valor exacto que el que se obtendría en una optimización individual.

Se considera que no es necesario considerar un mayor número de casos, puesto que se obtienen unos valores irreales, es decir, no se encuentran captadores y depósitos de estas dimensiones, por lo que habrá que buscar que valores frecuentes en el mercado son más parecidos a los obtenidos por las funciones, tal y como se realizó en el análisis de resultados de las funciones de Sevilla. Por tanto, se propone comprobar los resultados obtenidos con los que se pueden encontrar en el mercado real.

Se ha limitado las funciones a la comunidad andaluza para tener unas funciones más exactas, en el caso del área de un R^2 del 99,98 % y en el volumen de 99,92%, ya que la precisión se alcanza al simular mayor número de casos, por lo que si se quisiera buscar unas funciones de las que obtener unos valores económicos óptimos de superficie de captadores y volumen del depósito que caracteriza a la instalación. Por tanto, si se quisiera obtener una función que abarcara todos los casos posibles de España habría que introducir situaciones de todas las zonas, casos más comunes y otros más característicos, como es el caso de la vivienda y su factor de centralización, lo que supondría un gran historial de datos, pues hay zonas climáticas distintas donde puede imponerse una fracción de demanda cubierta del 30%, mientras en otras el reglamento impone un 70%.

Para concluir, se consideran unas buenas aproximaciones las obtenidas con la interpolación de datos en la comunidad autónoma de Andalucía, siendo necesario normalmente un polinomio de segundo grado con términos cruzados para alcanzar una alta confianza. Aunque se obtengan valores ligeramente distintos a los que se obtendrían con el tratamiento del caso individual se considera válido, pues posteriormente habrá que estudiar todo el mercado existente las dimensiones de los dispositivos que ofrecen.

Anexo A

Capital de provincia	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>A Coruña</i>	10	10	11	12	13	14	16	16	15	14	12	11
<i>Albacete</i>	7	8	9	11	14	17	19	19	17	13	9	7
<i>Alicante/Alacant</i>	11	12	13	14	16	18	20	20	19	16	13	12
<i>Almería</i>	12	12	13	14	16	18	20	21	19	17	14	12
<i>Ávila</i>	6	6	7	9	11	14	17	16	14	11	8	6
<i>Badajoz</i>	9	10	11	13	15	18	20	20	18	15	12	9
<i>Barcelona</i>	9	10	11	12	14	17	19	19	17	15	12	10
<i>Bilbao/Bilbo</i>	9	10	10	11	13	15	17	17	16	14	11	10
<i>Burgos</i>	5	6	7	9	11	13	16	16	14	11	7	6
<i>Cáceres</i>	9	10	11	12	14	18	21	20	19	15	11	9
<i>Cádiz</i>	12	12	13	14	16	18	19	20	19	17	14	12
<i>Castellón/Castelló</i>	10	11	12	13	15	18	19	20	18	16	12	11
<i>Ceuta</i>	11	11	12	13	14	16	18	18	17	15	13	12
<i>Ciudad Real</i>	7	8	10	11	14	17	20	20	17	13	10	7
<i>Córdoba</i>	10	11	12	14	16	19	21	21	19	16	12	10
<i>Cuenca</i>	6	7	8	10	13	16	18	18	16	12	9	7
<i>Girona</i>	8	9	10	11	14	16	19	18	17	14	10	9
<i>Granada</i>	8	9	10	12	14	17	20	19	17	14	11	8
<i>Guadalajara</i>	7	8	9	11	14	17	19	19	16	13	9	7
<i>Huelva</i>	12	12	13	14	16	18	20	20	19	17	14	12
<i>Huesca</i>	7	8	10	11	14	16	19	18	17	13	9	7
<i>Jaén</i>	9	10	11	13	16	19	21	21	19	15	12	9
<i>Las Palmas de Gran Canaria</i>	15	15	16	16	17	18	19	19	19	18	17	16
<i>León</i>	6	6	8	9	12	14	16	16	15	11	8	6
<i>Lleida</i>	7	9	10	12	15	17	20	19	17	14	10	7
<i>Logroño</i>	7	8	10	11	13	16	18	18	16	13	10	8
<i>Lugo</i>	7	8	9	10	11	13	15	15	14	12	9	8
<i>Madrid</i>	8	8	10	12	14	17	20	19	17	13	10	8
<i>Málaga</i>	12	12	13	14	16	18	20	20	19	16	14	12
<i>Melilla</i>	12	13	13	14	16	18	20	20	19	17	14	13
<i>Murcia</i>	11	11	12	13	15	17	19	20	18	16	13	11
<i>Ourense</i>	8	10	11	12	14	16	18	18	17	13	11	9
<i>Oviedo</i>	9	9	10	10	12	14	15	16	15	13	10	9
<i>Palencia</i>	6	7	8	10	12	15	17	17	15	12	9	6
<i>Palma de Mallorca</i>	11	11	12	13	15	18	20	20	19	17	14	12
<i>Pamplona/Iruña</i>	7	8	9	10	12	15	17	17	16	13	9	7
<i>Pontevedra</i>	10	11	11	13	14	16	17	17	16	14	12	10
<i>Salamanca</i>	6	7	8	10	12	15	17	17	15	12	8	6
<i>San Sebastián</i>	9	9	10	11	12	14	16	16	15	14	11	9
<i>Santa Cruz de Tenerife</i>	15	15	16	16	17	18	20	20	20	18	17	16
<i>Santander</i>	10	10	11	11	13	15	16	16	16	14	12	10
<i>Segovia</i>	6	7	8	10	12	15	18	18	15	12	8	6
<i>Sevilla</i>	11	11	13	14	16	19	21	21	20	16	13	11
<i>Soria</i>	5	6	7	9	11	14	17	16	14	11	8	6
<i>Tarragona</i>	10	11	12	14	16	18	20	20	19	16	12	11
<i>Teruel</i>	6	7	8	10	12	15	18	17	15	12	8	6
<i>Toledo</i>	8	9	11	12	15	18	21	20	18	14	11	8
<i>Valencia</i>	10	11	12	13	15	17	19	20	18	16	13	11
<i>Valladolid</i>	6	8	9	10	12	15	18	18	16	12	9	7
<i>Vitoria-Gasteiz</i>	7	7	8	10	12	14	16	16	14	12	8	7
<i>Zamora</i>	6	8	9	10	13	16	18	18	16	12	9	7
<i>Zaragoza</i>	8	9	10	12	15	17	20	19	17	14	10	8

Tabla 73 Temperatura media del agua fría

Anexo B

Este anexo contiene los resultados relativos a la radiación y los índices usados en los cálculos para conseguir el resultado final de radiación total sobre superficie inclinada. El índice que relaciona la radiación extraterrestre en superficie horizontal y la radiación horizontal es el índice de claridad diario:

$$\overline{K_T} = \frac{\overline{H}}{\overline{H_o}}$$

En la siguiente tabla aparecen reflejados los valores mensuales para el caso de Sevilla.

MES	Extraterrestre en superficie horizontal (\overline{H} [$MJ/m^2 día$])	Índice claridad diario ($\overline{K_T}$)	Global horizontal ($\overline{H_o}$ [$MJ/m^2 día$])
1	16,81	0,54	9,1
2	22,01	0,55	12,2
3	28,60	0,56	16
4	35,29	0,56	19,8
5	39,87	0,60	24,1
6	41,68	0,62	25,9
7	40,70	0,67	27,2
8	36,99	0,67	24,8
9	30,97	0,62	19,2
10	23,90	0,60	14,3
11	18,00	0,57	10,2
12	15,37	0,54	8,3

Tabla 74 Índice de claridad, radiación extraterrestre en superficie horizontal y global horizontal mensual en Sevilla

Siguiendo los pasos expuestos en el apartado Método f-Chart se obtienen los siguientes valores de radiación directa, difusa, reflejada y la total, siendo ésta la suma de las anteriores.

La superficie de captación se supone con una inclinación de 45° al sur, previa comprobación que cumple los valores máximos de pérdidas impuestos en una disposición general.

Estos valores se consideran similares en todas las instalaciones de Sevilla, independientemente de la ocupación, demanda, uso del edificio, características del captador, ... Tan sólo variará si cambia la inclinación de la superficie de captación.

MES	Directa [MJ/m²día]	Difusa [MJ/m²día]	Reflejada [MJ/m²día]	Total sobre superficie Inclinada [MJ/m²día]
1	12,86	2,74	0,26	15,86
2	13,95	3,55	0,36	17,85
3	13,25	5,11	0,48	18,84
4	12,39	6,30	0,58	19,27
5	12,90	6,88	0,71	20,48
6	12,82	7,06	0,76	20,64
7	14,93	6,47	0,80	22,19
8	16,31	5,86	0,72	22,89
9	15,41	5,26	0,57	21,24
10	14,98	4,15	0,42	19,55
11	14,02	2,87	0,30	17,2
12	12,54	2,50	0,25	15,29

Tabla 75 Radiación desglosada en Sevilla

Anexo C

	Latitud	MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Córdoba	37,89155	H_h (MJ/m ² · día)	8,8	11,6	15,1	18,2	23,1	25,5	27,2	24,9	18,7	13,5	10,1	8
Zona 4		T_{am} (°C)	9,5	10,9	13,1	15,2	19,2	23,1	26,9	26,7	23,7	18,4	12,9	9,7
Huelva	37,26638	H_h (MJ/m ² · día)	8,5	11,7	15,5	19,9	24	25,6	27,1	24,8	19,4	13,7	9,6	7,5
Zona 5		T_{am} (°C)	12,2	12,8	14,4	16,5	19,2	22,2	25,3	25,7	23,7	20	15,4	12,5
Sevilla	37,38283	H_h (MJ/m ² · día)	9,1	12,2	16	19,8	24,1	25,9	27,2	24,8	19,2	14,3	10,2	8,3
Zona 5		T_{am} (°C)	10,7	11,9	14	16	19,6	23,4	26,8	26,8	24,4	19,5	14,3	11,1
Cádiz	36,52978	H_h (MJ/m ² · día)	9,3	12,3	16,4	20,4	24,6	26,3	27,2	25,2	19,4	14,8	10,4	8,5
Zona 4		T_{am} (°C)	12,8	13,5	14,7	16,2	18,7	21,5	24	24,5	23,5	20,1	16,1	13,3
Jaén	37,76922	H_h (MJ/m ² · día)	8,7	11,6	15,7	19,3	24	26,1	27,9	24,6	18,8	13,7	10,4	7,4
Zona 4		T_{am} (°C)	8,7	9,9	12	14,3	18,5	23,1	27,2	27,1	23,6	17,6	12,2	8,7
Málaga	36,72016	H_h (MJ/m ² · día)	9,4	12	16,1	19,3	23,9	25,9	26,5	24,1	18,9	14,1	10,2	8,4
Zona 4		T_{am} (°C)	12,2	12,8	14	15,8	18,7	22,1	24,7	25,3	23,1	19,1	15,1	12,6
Granada	37,18817	H_h (MJ/m ² · día)	9	11,7	15,9	19,2	24	26,7	27,8	25,1	19,1	13,9	9,9	8
Zona 4		T_{am} (°C)	6,5	8,4	10,5	12,4	16,3	21,1	24,3	24,1	21,1	15,4	10,6	7,4
Almería	36,83814	H_h (MJ/m ² · día)	9,7	12,6	15,9	20	24,1	26,1	26,5	23,7	19,1	14,3	10,5	8,8
Zona 5		T_{am} (°C)	12,4	13	14,4	16,1	18,7	22,3	25,5	26	24,1	20,1	16,2	13,3

Tabla 76 Radiación media mensual diaria y temperatura ambiente en las provincias andaluzas

Provincia Córdoba Latitud: 37,89 °

	$A [m^2]$	$FO[€]$	f_{anual}	$L_{anual} \left[\frac{J}{año} \right]$	$M_{ac} \left[\frac{L}{día} \right]$	V/A	$V [L]$	$Personas$	$\frac{L}{Persona}$
Hotel 5*	55,98	28801	0,6	2,40E+14	5175	53,72	3007	75	69
	93,3	48002	0,6	4,00E+14	8625	53,74	5014	125	69
	164,6	86300	0,7	5,61E+14	12075	62	10203	175	69
	211,6	110957	0,7	7,21E+14	15525	62	13118	225	69
	258,6	135615	0,7	8,81E+14	18975	62	16033	275	69
	305,6	160272	0,7	1,04E+15	22425	62	18948	325	69
	352,7	184929	0,7	1,20E+15	25875	62	21863	375	69
Viviendas	5,369	2738	0,5	2,96E+13	638,4	50	268,4	24	26,6
	10,17	5188	0,5	5,62E+13	1210	50	508,6	48	25,2
	15,26	7782	0,5	8,42E+13	1814	50	762,9	72	25,2
	19,21	9799	0,5	1,06E+14	2285	50	960,7	96	23,8
	24,02	12249	0,5	1,33E+14	2856	50	1201	120	23,8
	28,82	14699	0,5	1,59E+14	3427	50	1441	144	23,8
	33,63	17149	0,5	1,86E+14	3998	50	1681	168	23,8
	38,43	19599	0,5	2,12E+14	4570	50	1921	192	23,8
Residencia	32,76	16705	0,5	1,81E+14	3895	50	1638	95	41
	39,65	20222	0,5	2,19E+14	4715	50	1983	115	41
	59,87	30805	0,6	2,57E+14	5535	53,75	3218	135	41
	68,74	35368	0,6	2,95E+14	6355	53,75	3695	155	41
	77,61	39932	0,6	3,33E+14	7175	53,75	4172	175	41

Tabla 77 Optimizaciones en instalaciones de Córdoba

Provincia Huelva Latitud: 37,27 °

	$A [m^2]$	$FO[€]$	f_{anual}	$L_{anual} \left[\frac{J}{año} \right]$	$M_{ac} \left[\frac{L}{día} \right]$	V/A	$V [L]$	$Personas$	$\frac{L}{Persona}$
Hotel 5*	69,56	36490	0,7	2,36E+14	5175	62,15	4323	75	69
	115,9	60817	0,7	3,94E+14	8625	62,15	7206	125	69
	162,3	85144	0,7	5,51E+14	12075	62,15	10088	175	69
	208,7	109471	0,7	7,09E+14	15525	62,15	12970	225	69
	255,1	133798	0,7	8,66E+14	18975	62,15	15853	275	69
	301,4	158125	0,7	1,02E+15	22425	62,15	18735	325	69
	347,8	182452	0,7	1,18E+15	25875	62,15	21617	375	69
Viviendas	7	3507	0,6	2,91E+13	638,4	53,87	367,1	24	26,6
	12,91	6645	0,6	5,52E+13	1210	53,87	695,6	48	25,2
	19,37	9968	0,6	8,28E+13	1814	53,87	1043	72	25,2
	24,39	12553	0,6	1,04E+14	2285	53,87	1314	96	23,8
	30,49	15691	0,6	1,30E+14	2856	53,87	1642	120	23,8
	36,59	18829	0,6	1,56E+14	3427	53,87	1971	144	23,8
	42,68	21967	0,6	1,83E+14	3998	53,87	2299	168	23,8
	48,78	25105	0,6	2,09E+14	4570	53,87	2628	192	23,8
Residencia	41,58	21399	0,6	1,78E+14	3895	53,87	2240	95	41
	50,33	25904	0,6	2,15E+14	4715	53,87	2711	115	41
	74,4	39029	0,7	2,53E+14	5535	62,15	4624	135	41
	85,42	44811	0,7	2,90E+14	6355	62,15	5309	155	41
	96,44	50593	0,7	3,28E+14	7175	62,15	5994	175	41

Tabla 78 Optimizaciones en instalaciones de Huelva

Provincia Sevilla Latitud: 37,38°

	$A [m^2]$	$FO[€]$	f_{anual}	$L_{anual} \left[\frac{J}{año} \right]$	$M_{ac} \left[\frac{L}{día} \right]$	V/A	$V [L]$	$Personas$	$\frac{L}{Persona}$
Hotel 5*	66,26	34498	0,7	2,37E+14	5175	58,89	3902	75	69
	110,4	57497	0,7	3,95E+14	8625	58,89	6504	125	69
	154,6	80496	0,7	5,53E+14	12075	58,89	9105	175	69
	198,8	103494	0,7	7,11E+14	15525	58,89	11706	225	69
	242,9	126493	0,7	8,69E+14	18975	58,89	14308	275	69
	287,1	149492	0,7	1,03E+15	22425	58,89	16909	325	69
	331,3	172491	0,7	1,18E+15	25875	58,89	19511	375	69
Viviendas	6.504	3328	0,6	2,92E+13	638,4	51,37	334,1	24	26,6
	12,32	6305	0,6	5,54E+13	1210	51,37	633	48	25,2
	18,49	9458	0,6	8,31E+13	1814	51,37	949,5	72	25,2
	23,28	11910	0,6	1,05E+14	2285	51,37	1196	96	23,8
	29,1	14888	0,6	1,31E+14	2856	51,37	1495	120	23,8
	34,92	17865	0,6	1,57E+14	3427	51,37	1794	144	23,8
	40,74	20843	0,6	1,83E+14	3998	51,37	2093	168	23,8
	46,56	23820	0,6	2,09E+14	4570	51,37	2391	192	23,8
Residencia	39,68	20304	0,6	1,78E+14	3895	51,37	2038	95	41
	48,04	24578	0,6	2,16E+14	4715	51,37	2468	115	41
	70,86	36898	0,7	2,53E+14	5535	58,91	4175	135	41
	81,36	42364	0,7	2,91E+14	6355	58,91	4793	155	41
	91,86	47831	0,7	3,28E+14	7175	58,91	5412	175	41

Tabla 79 Optimizaciones en instalaciones de Sevilla

Provincia Cádiz Latitud: 36,53°

	$A [m^2]$	$FO[€]$	f_{anual}	$L_{anual} \left[\frac{J}{año} \right]$	$M_{ac} \left[\frac{L}{día} \right]$	V/A	$V [L]$	$Personas$	$\frac{L}{Persona}$
Hotel 5*	51,96	26526	0,6	2,37E+14	5175	50,46	2621	75	69
	86,59	44209	0,6	3,95E+14	8625	50,46	4369	125	69
	152	78929	0,7	5,53E+14	12075	57,62	8760	175	69
	195,5	101480	0,7	7,11E+14	15525	57,62	11263	225	69
	238,9	124032	0,7	8,69E+14	18975	57,62	13766	275	69
	282,4	146583	0,7	1,03E+15	22425	57,62	16269	325	69
	325,8	169134	0,7	1,18E+15	25875	57,62	18772	375	69
Viviendas	4,972	2536	0,5	2,92E+13	638,4	50	248,6	24	26,6
	9,42	4804	0,5	5,54E+13	1210	50	471	48	25,2
	14,13	7206	0,5	8,31E+13	1814	50	706,5	72	25,2
	17,79	9074	0,5	1,05E+14	2285	50	889,7	96	23,8
	22,24	11343	0,5	1,31E+14	2856	50	1112	120	23,8
	26,69	13612	0,5	1,57E+14	3427	50	1334	144	23,8
	31,14	15880	0,5	1,83E+14	3998	50	1557	168	23,8
	35,59	18149	0,5	2,09E+14	4570	50	1779	192	23,8
Residencia	30,33	15470	0,5	1,78E+14	3895	50	1517	95	41
	36,72	18726	0,5	2,16E+14	4715	50	1836	115	41
	55,57	28371	0,6	2,53E+14	5535	50,45	2804	135	41
	63,8	32574	0,6	2,91E+14	6355	50,46	3219	155	41
	72,03	36777	0,6	3,28E+14	7175	50,46	3635	175	41

Tabla 80 Optimizaciones en instalaciones de Cádiz

Provincia Jaén Latitud: 37,77°

	$A [m^2]$	$FO[€]$	f_{anual}	$L_{anual} \left[\frac{J}{año} \right]$	$M_{ac} \left[\frac{L}{día} \right]$	V/A	$V [L]$	$Personas$	$\frac{L}{Persona}$
Hotel 5*	56,19	28865	0,6	2,44E+14	5175	53,09	2983	75	69
	93,65	48108	0,6	4,07E+14	8625	53,09	4972	125	69
	165,3	86586	0,7	5,70E+14	12075	61,43	10156	175	69
	212,6	111325	0,7	7,33E+14	15525	61,43	13058	225	69
	259,8	136064	0,7	8,96E+14	18975	61,43	15960	275	69
	307	160803	0,7	1,06E+15	22425	61,43	18861	325	69
	354,3	185542	0,7	1,22E+15	25875	61,43	21763	375	69
Viviendas	5,377	2742	0,5	3,01E+13	638,4	50	268,9	24	26,6
	10,19	5196	0,5	5,71E+13	1210	50	509,4	48	25,2
	15,28	7794	0,5	8,56E+13	1814	50	764,1	72	25,2
	19,24	9814	0,5	1,08E+14	2285	50	962,2	96	23,8
	24,06	12268	0,5	1,35E+14	2856	50	1203	120	23,8
	28,87	14722	0,5	1,62E+14	3427	50	1443	144	23,8
	33,68	17175	0,5	1,89E+14	3998	50	1684	168	23,8
	38,49	19629	0,5	2,16E+14	4570	50	1924	192	23,8
Residencia	32,81	16731	0,5	1,84E+14	3895	50	1640	95	41
	39,71	20253	0,5	2,23E+14	4715	50	1986	115	41
	60,1	30873	0,6	2,61E+14	5535	53,09	3191	135	41
	69	35447	0,6	3,00E+14	6355	53,09	3663	155	41
	77,91	40021	0,6	3,39E+14	7175	53,09	4136	175	41

Tabla 81 Optimizaciones en instalaciones de Jaén

Provincia Málaga Latitud: 36,72°

	$A [m^2]$	$FO[€]$	f_{anual}	$L_{anual} \left[\frac{J}{año} \right]$	$M_{ac} \left[\frac{L}{día} \right]$	V/A	$V [L]$	$Personas$	$\frac{L}{Persona}$
Hotel 5*	53,96	27672	0,6	2,37E+14	5175	52,36	2825	75	69
	89,93	46121	0,6	3,95E+14	8625	52,36	4709	125	69
	158,1	82483	0,7	5,53E+14	12075	59,88	9465	175	69
	203,2	106050	0,7	7,11E+14	15525	59,88	12169	225	69
	248,4	129616	0,7	8,69E+14	18975	59,88	14873	275	69
	293,5	153183	0,7	1,03E+15	22425	59,88	17577	325	69
	338,7	176749	0,7	1,18E+15	25875	59,88	20281	375	69
Viviendas	5.179	2641	0,5	2,92E+13	638,4	50	258,9	24	26,6
	9.812	5004	0,5	5,54E+13	1210	50	490,6	48	25,2
	14,72	7506	0,5	8,31E+13	1814	50	735,9	72	25,2
	18,53	9452	0,5	1,05E+14	2285	50	926,7	96	23,8
	23,17	11815	0,5	1,31E+14	2856	50	1158	120	23,8
	27,8	14178	0,5	1,57E+14	3427	50	1390	144	23,8
	32,43	16542	0,5	1,83E+14	3998	50	1622	168	23,8
	37,07	18905	0,5	2,09E+14	4570	50	1853	192	23,8
Residencia	31,6	16114	0,5	1,78E+14	3895	50	1580	95	41
	38,25	19506	0,5	2,16E+14	4715	50	1912	115	41
	57,72	29597	0,6	2,53E+14	5535	52,33	3020	135	41
	66,27	33982	0,6	2,91E+14	6355	52,35	3469	155	41
	74,81	38367	0,6	3,28E+14	7175	52,36	3917	175	41

Tabla 82 Optimizaciones en instalaciones de Málaga

Provincia Granada Latitud: 37,19°

	$A [m^2]$	$FO[€]$	f_{anual}	$L_{anual} \left[\frac{J}{año} \right]$	$M_{ac} \left[\frac{L}{día} \right]$	V/A	$V [L]$	$Personas$	$\frac{L}{Persona}$
Hotel 5*	58,07	29769	0,6	2,55E+14	5175	52,23	3033	75	69
	96,78	49615	0,6	4,25E+14	8625	52,23	5055	125	69
	170,6	89068	0,7	5,95E+14	12075	60,17	10263	175	69
	219,3	114516	0,7	7,65E+14	15525	60,17	13196	225	69
	268	139963	0,7	9,35E+14	18975	60,17	16128	275	69
	316,8	165411	0,7	1,11E+15	22425	60,17	19060	325	69
	365,5	190859	0,7	1,28E+15	25875	60,17	21993	375	69
Viviendas	5.556	2834	0,5	3,15E+13	638,4	50	277,8	24	26,6
	10,53	5369	0,5	5,96E+13	1210	50	526,4	48	25,2
	15,79	8053	0,5	8,94E+13	1814	50	789,5	72	25,2
	19,88	10141	0,5	1,13E+14	2285	50	994,2	96	23,8
	24,86	12676	0,5	1,41E+14	2856	50	1243	120	23,8
	29,83	15212	0,5	1,69E+14	3427	50	1491	144	23,8
	34,8	17747	0,5	1,97E+14	3998	50	1740	168	23,8
	39,77	20282	0,5	2,25E+14	4570	50	1988	192	23,8
Residencia	33,9	17288	0,5	1,92E+14	3895	50	1695	95	41
	41,03	20927	0,5	2,32E+14	4715	50	2052	115	41
	62,11	31840	0,6	2,73E+14	5535	52,19	3242	135	41
	71,31	36557	0,6	3,13E+14	6355	52,22	3723	155	41
	80,51	41274	0,6	3,53E+14	7175	52,22	4204	175	41

Tabla 83 Optimizaciones en instalaciones de Granada

Provincia Almería *Latitud: 36,84°*

	$A [m^2]$	$FO[€]$	f_{anual}	$L_{anual} \left[\frac{J}{año} \right]$	$M_{ac} \left[\frac{L}{día} \right]$	V/A	$V [L]$	$Personas$	$\frac{L}{Persona}$
Hotel 5*	64,98	33712	0,7	2,36E+14	5175	57,36	3727	75	69
	108,3	56187	0,7	3,93E+14	8625	57,37	6212	125	69
	151,6	78662	0,7	5,50E+14	12075	57,37	8697	175	69
	194,9	101136	0,7	7,07E+14	15525	57,37	11182	225	69
	238,2	123611	0,7	8,64E+14	18975	57,37	13667	275	69
	281,6	146086	0,7	1,02E+15	22425	57,37	16152	325	69
	324,9	168561	0,7	1,18E+15	25875	57,37	18637	375	69
Viviendas	6,396	3265	0,6	2,91E+13	638,4	50,4	322,3	24	26,6
	12,12	6187	0,6	5,51E+13	1210	50,4	610,8	48	25,2
	18,18	9280	0,6	8,26E+13	1814	50,4	916,1	72	25,2
	22,89	11686	0,6	1,04E+14	2285	50,4	1154	96	23,8
	28,62	14607	0,6	1,30E+14	2856	50,4	1442	120	23,8
	34,34	17529	0,6	1,56E+14	3427	50,4	1731	144	23,8
	40,06	20450	0,6	1,82E+14	3998	50,4	2019	168	23,8
	45,78	23372	0,6	2,08E+14	4570	50,4	2307	192	23,8
Residencia	39,03	19922	0,6	1,77E+14	3895	50,4	1967	95	41
	47,24	24116	0,6	2,15E+14	4715	50,4	2381	115	41
	69,5	36057	0,7	2,52E+14	5535	57,36	3986	135	41
	79,79	41399	0,7	2,89E+14	6355	57,37	4577	155	41
	90,09	46741	0,7	3,27E+14	7175	57,37	5168	175	41

Tabla 84 Optimizaciones en instalaciones de Almería

Se va a explicar en este Anexo un caso aislado, donde se describe el procedimiento empleado en el trabajo en general. En este trabajo se ha recurrido al software *EES*, un solver capaz de resolver un gran número de ecuaciones mediante la iteración. Igualmente, ofrece otras herramientas en las que se ha apoyado este trabajo y que a continuación se explicarán.

En primer lugar, se han escrito en el software las ecuaciones definidas por el método f-Chart. El método f-Chart consiste en obtener como resultado la fracción de demanda mensual de un caso definido por una ubicación geográfica (temperaturas, latitud, radiación, ...), por una demanda fijada por el servicio que ofrece el edificio, por un área de captación y un volumen de acumulación. Con estas fracciones de cobertura de demandas mensuales se calcularía la fracción de cobertura de demanda anual. Esta demanda es comparada con la mínima exigida en el código técnico, y si no se cumple se fijan un área y volumen distintos y se vuelve a comprobar.

Con el EES se propone definir todas las ecuaciones del método f-Chart, fijar una fracción de demanda mínima, igualmente se fijarán las condiciones relacionadas con la demanda y la ubicación, por lo quedará una variable libre, no se les dará valores a las variables de área de captación y de volumen de acumulación, además se añadirá una función objetivo, que definiría el coste económico de la instalación dependiendo del volumen y del área, es decir, una vez fijadas estas variables se obtendría el coste económico. Quedaría una variable libre, por lo que seleccionaría minimizar la función objetivo anteriormente descrita y se obtendría un área y un volumen que minimizaría el precio. Al realizar esta operación con múltiples casos, que engloben distintas ubicaciones y demandas, se puede obtener una función polinómica que describa el comportamiento de área y volumen en función de la demanda en términos energéticos y de la fracción anual exigida por el reglamento.

En este trabajo se han obtenido unas funciones polinómicas que definen el valor del área de captación y del volumen de acumulación en función de la demanda y de la fracción anual de cobertura de demanda. Éstas serán válidas en el territorio de Andalucía, ya que dicha función se ha interpolado con múltiples casos de las provincias andaluzas.

Se va a proceder a exponer un caso, y a comparar los resultados obtenidos mediante la optimización del caso aislado por *EES*, y el uso de la función polinómica obtenida.

Se eligen como ubicación Cádiz, y, por consiguiente, su latitud, temperatura ambiente ambiente, temperatura de la red de agua mensual. Se fija la inclinación del captador en 45 °, con una orientación al sur, por lo que el ángulo de acimut es nulo ($\alpha = 0$). Se establece la hipótesis de que no se producen sombras por captadores contiguos, ni por edificios próximos, por lo que se espera unas pérdidas por sombras nulas para todos los casos. Se van a calcular las pérdidas por orientación e inclinación de cada caso, sabiendo que lo máximo que puede tener es un 10% de pérdidas por orientación e inclinación:

Caso	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	10 %	10 %	15 %
Superposición de captadores	20 %	15 %	30 %
Integración	40 %	20 %	50 %

Tabla 85 Pérdidas máximas por orientación e inclinación y sombras

Las pérdidas asociadas a la inclinación se obtendrán según el CTE HE4 en función del ángulo de acimut (α), el ángulo de inclinación utilizado (β) y el ángulo de inclinación óptimo ($\beta_{\text{óptimo}}$) se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$\text{Pérdidas (\%)} = 100 \cdot \left[1,2 \cdot 10^{-4} (\beta - \beta_{\text{óptimo}})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2 \right]$$

Siendo cada término:

$$\alpha = 0^\circ \quad \beta_{\text{óptimo}} = \text{latitud} \quad \beta = 45^\circ$$

Con lo que se obtienen unas pérdidas de 0,627 %, cumpliendo así lo establecido en el reglamento.

Se ha ubicado en Cádiz una residencia de 100 personas, lo que implica 41 litros por persona y día de agua caliente.

$$M_{ac} = 100 \text{ personas} \cdot 41 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 4100 \text{ litros/día}$$

Se trata de zona IV, por lo que se impone una fracción anual de contribución solar del 50 %.

DEMANDA TOTAL DE ACS DEL EDIFICIO (L/D) A 60°C	ZONA CLIMÁTICA				
	I	II	III	IV	V
50 - 5000	30	30	40	50	60
5000 - 10000	30	40	50	60	70
10000	30	50	60	70	70

Tabla 86 Contribución solar mínima (%) para ACS

Para aplicar las funciones polinómicas extraídas es necesario conocer la fracción anual y la demanda energética anual:

$$f_{\text{anual}} = 0,5$$

$$L_{\text{anual}} = 1,88 \cdot 10^{11} \text{ J/año}$$

Al sustituir los términos en las siguientes ecuaciones se obtienen los resultados referidos en la siguiente tabla. La siguiente función engloba todos los casos de Andalucía, de ella se obtiene el valor del área para un coste mínimo de la instalación y presenta un fiabilidad de 99,98%:

$$\begin{aligned} A = & -6,28069842 \cdot 10^{02} + 5,89517764 \cdot 10^{01} H_{\text{anual}} - 1,22412776 \cdot 10^{00} H_{\text{anual}}^2 \\ & + 4,03191608 \cdot 10^{02} f_{\text{anual}} + 7,86730131 \cdot 10^{01} f_{\text{anual}}^2 + 2,92620356 \cdot 10^{-10} L_{\text{anual}} \\ & + 1,79130107 \cdot 10^{-24} L_{\text{anual}}^2 - 2,85081309 \cdot 10^{01} H_{\text{anual}} f_{\text{anual}} - 2,24659588 \cdot 10^{-11} H_{\text{anual}} L_{\text{anual}} \\ & + 5,46914375 \cdot 10^{-10} f_{\text{anual}} L_{\text{anual}} \end{aligned}$$

De la función que sigue se obtiene el valor del volumen con una fiabilidad del 99,92 %:

$$\begin{aligned} V = & -4,54870518 \cdot 10^{07} + 6,58705115 \cdot 10^{06} H_{\text{anual}} - 3,90744969 \cdot 10^{05} H_{\text{anual}}^2 \\ & + 7,70113581 \cdot 10^{03} H_{\text{anual}}^3 + 3,01504027 \cdot 10^{07} f_{\text{anual}} - 6,34007337 \cdot 10^{07} f_{\text{anual}}^2 \\ & + 4,09591224 \cdot 10^{07} f_{\text{anual}}^3 + 1,08818534 \cdot 10^{-06} L_{\text{anual}} - 6,93482234 \cdot 10^{-19} L_{\text{anual}}^2 \\ & + 9,75960683 \cdot 10^{-34} L_{\text{anual}}^3 + 1,52007416 \cdot 10^{06} H_{\text{anual}} f_{\text{anual}} - 1,14276146 \cdot 10^{06} H_{\text{anual}} f_{\text{anual}}^2 \\ & - 1,17467955 \cdot 10^{-07} H_{\text{anual}} L_{\text{anual}} + 8,11725293 \cdot 10^{-20} H_{\text{anual}} L_{\text{anual}}^2 \\ & - 4,21522240 \cdot 10^{04} H_{\text{anual}}^2 f_{\text{anual}} + 3,15374458 \cdot 10^{04} H_{\text{anual}}^2 f_{\text{anual}}^2 \\ & + 3,27296952 \cdot 10^{-09} H_{\text{anual}}^2 L_{\text{anual}} - 2,32712428 \cdot 10^{-21} H_{\text{anual}}^2 L_{\text{anual}}^2 \\ & - 1,27144744 \cdot 10^{-07} f_{\text{anual}} L_{\text{anual}} - 3,20880976 \cdot 10^{-20} f_{\text{anual}} L_{\text{anual}}^2 \\ & + 1,47235074 \cdot 10^{-07} f_{\text{anual}}^2 L_{\text{anual}} + 1,27886811 \cdot 10^{-20} f_{\text{anual}}^2 L_{\text{anual}}^2 \end{aligned}$$

Sustituyendo en ellas los valores de demanda en términos energéticos y fracción mínima anual de demanda cubierta exigida por el reglamento se obtiene un área y un volumen:

$$\text{Volumen} = 1577 \text{ L}$$

$$\text{Área} = 31,89 \text{ m}^2$$

Se va a comparar con el resultado obtenido mediante el software *EES*, por lo que se introducen los datos anteriormente referidos y se selecciona optimizar la función objetivo económica en función de la variable definida como V/A , es decir, se optimiza la función objetivo variando tan sólo esta relación. Puesto que se debe de cumplir el código técnico HE4, se debe asignar valores entre los límites:

$$50 < \frac{V}{A} < 180$$

Por tanto, variando los valores entre dichos límites se optimizará la función económica:

$$FO[\text{€}] = 450 \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] \cdot \text{Área} [\text{m}^2] + 1,2 \left[\frac{\text{€}}{\text{L}} \right] \cdot \text{Volumen} [\text{L}]$$

Se selecciona la opción min/max que ofrece el software y se obtiene como resultado $\frac{V}{A} = 50$, en el límite establecido por el código técnico, y unos valores de área y volumen:

$$\text{Volumen} = 1596 \text{ L}$$

$$\text{Área} = 31,93 \text{ m}^2$$

Se representan los resultados en la siguiente tabla:

	VOLUMEN [L]	ÁREA [m ²]
Con ecuación	1577	31,89
Con optimización individual	1596	31,93

Tabla 87 Resultados

Como se puede apreciar tienen una buena aproximación, sin embargo los valores que se obtienen no se ofrecen en el mercado, por lo que habría que comprobar las medidas más cercanas de los dispositivos que se encuentran en el mercado. Se concluye que es una buena aproximación, ya que a la hora de realizar optimizaciones individuales para posteriormente extraer la función polinómica no se ha tenido en cuenta este caso.

REFERENCIAS

1. **Fernández Salgado, José M. y Gallardo Rodríguez, Vicente.** *Energía solar térmica en la edificación*. s.l. : AMV Ediciones, 2004.
2. **Red Eléctrica de España S.A.**
3. **IDAE.** *Manuales de energías renovables. Energía solar térmica*. Madrid : s.n., 2006.
4. **Agencia, Andaluza de la Energía.** *Energía solar térmica a baja temperatura. Generalidades*.
5. **La energía solar en Andalucía.** 2018.
6. **DB-HE: Ahorro de la Energía. HE 4.** 2013.
7. <http://www.saclima.com/producto/captador-solar-plano-120-x-350-m/>. [En línea]
8. **Guía práctica sobre instalaciones individuales de calefacción y ACS en edificios de viviendas.** IDAE. 2011.
9. **Sistemas solar-térmicos: algoritmo operativo para aplicar el método f-Chart en la evaluación de colectores solares.** Obaco, Franklin y Jaramillo, Jorge. Loja (Ecuador) : s.n., 2010.